



Уральский  
федеральный  
университет

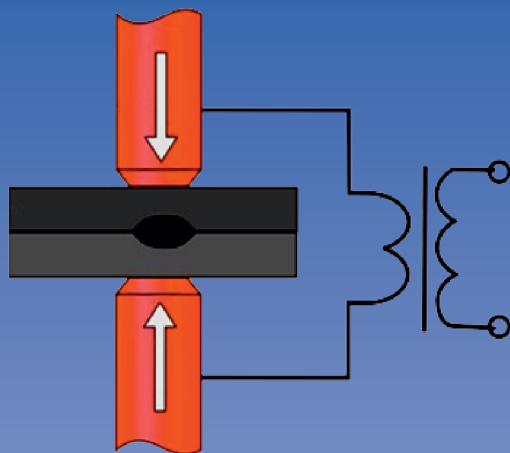
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Механико-  
машиностроительный  
институт

**Р. Ф. КАТАЕВ**  
**В. С. МИЛЮТИН**  
**М. Г. БЛИЗНИК**

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник**

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки  
150700 «Машиностроение» и специалитета по направлению  
150200 «Машиностроительные технологии и оборудование»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2015

УДК 621.791.76/.79(075.8)

ББК 34.641.52я73

К29

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. *В. И. Шумяков* (ООО «Уральский институт сварки»);

канд. техн. наук *М. А. Шолохов* (ООО «Шторм»)

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *М. П. Шалимов*

**Катаев, Р. Ф.**

К29 Теория и технология контактной сварки: учебное пособие /  
Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. — Екатеринбург :  
Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 144 с.

ISBN 978-5-7996-1491-1

В учебном пособии рассмотрены основные и сопутствующие процессы, сопровождающие формирование соединения при точечной, шовной, рельефной и стыковой контактной сварке. Освещены основные вопросы рационального проектирования и реализации технологических процессов получения сварных соединений контактной сваркой. Указаны области рационального применения способов контактной сварки.

Библиогр.: 16 назв. Табл. 14. Рис. 63.

УДК 621.791.76/.79(075.8)

ББК 34.641.52я73

ISBN 978-5-7996-1491-1

© Уральский федеральный  
университет, 2015

# ВВЕДЕНИЕ

---

**Контактная сварка** — один из наиболее распространенных и быстро развивающихся видов получения неразъемных соединений самых разнообразных конструкционных материалов в широком диапазоне толщин и сечений. В настоящее время около 40 % всех сварных соединений выполняется с помощью контактной сварки. По степени механизации и автоматизации контактная сварка занимает первое место среди других видов сварки.

Контактная сварка известна со второй половины прошлого века. В 1856 г. известный английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин) впервые предложил и применил стыковую сварку. В 1877 г. Э. Томсон (США) запатентовал стыковую сварку сопротивлением. Несколько позже, в 1888 г., русский изобретатель Н. Н. Бенардос запатентовал точечную и шовную сварку (по некоторым источникам — в том же 1877 г.). Стыковая сварка оплавлением была разработана в 1903 г. Широкое использование контактной сварки в нашей стране началось в 30-х годах XX в. после создания индустриальной базы.

Контактная сварка используется преимущественно в промышленном массовом или серийном производстве однотипных изделий. Область применения контактной сварки чрезвычайно широка — от крупногабаритных строительных конструкций, космических аппаратов до миниатюрных полупроводниковых устройств и пленочных микросхем.

Контактной сваркой можно успешно соединять практически все известные конструкционные материалы — низкоуглеродистые и легированные стали, жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы, сплавы на основе алюминия, магния и титана и др.

Точечная сварка — наиболее распространенный способ, на долю которого приходится около 70 % всех соединений, выполняемых контактной сваркой. Этот способ сварки широко используют в автомобиле- и вагоностроении, авиастроении, строительстве, радиоэлектронике и т. д. Например, в конструкциях современных авиалайнеров насчитывается несколько миллионов сварных точек, автомобилей — до 5000—7000, пассажирских железнодорожных вагонов — порядка 30000 точек. Диапазон свариваемых толщин — от нескольких микрон до 30 мм.

Стыковая сварка, преимущественно сварка оплавлением, составляет более 10 % от общего объема применения контактной сварки.

Стыковую сварку сопротивлением применяют в основном при соединении проволоки, стержней и труб из углеродистой и легированной стали относительно малых компактных сечений. В связи с тем, что не всегда удается обеспечить соединение высокого качества, этот способ используют ограниченно.

Более широкое применение нашла стыковая сварка оплавлением, ее успешно используют при соединении трубопроводов, железнодорожных рельсов (бесстыковые пути) в стационарных и полевых условиях, длинномерных заготовок из различных конструкционных сталей и сплавов, цветных металлов и др.

Стыковая сварка применяется при производстве режущего инструмента. Например, рабочая (режущая) часть, выполненная из инструментальных сталей и сплавов, сваривается с хвостовой (крепежной) частью из углеродистых качественных сталей, что удешевляет инструмент и улучшает его эксплуатационные характеристики.

Шовная сварка по объему применения занимает третье место среди контактных способов (около 10 %) и используется при изготовлении различных емкостей, корпусов изделий, в том числе герметичных, например топливных баков автомобилей и летательных аппаратов, емкостей для химической промышленности, различных труб, глушителей выхлопа автомобилей, бытовых моек, баков стиральных машин и шкафов холодильников, плоских отопительных радиаторов, сильфонов и других изделий, изготавливаемых из листовых заготовок. Кроме того, шовная сварка широко используется для выполнения прочноплотных швов элементов приборостроения. Плотность соединений, полученных шовной сваркой, обеспечивает высокую надежность герметичных сварных конструкций в условиях как низкого давления (высокого вакуума), так и высокого давления.

Рельефная сварка — наименее распространенный, но динамично развивающийся способ контактной сварки (объем применения около 5—7 % от общего объема контактных способов). Этот способ используется для крепления кронштейнов к листовым деталям, например скобы к капоту автомобиля, петли для навески дверей к кабине, для соединения крепежных деталей — болтов, гаек и шпилек и т. д. — с несущими элементами конструкций, крепления проволоки к тонким деталям в радиоэлектронике и др. Рельефная сварка по непрерывным замкнутым контурам позволяет получать герметичные соединения, в частности в микроэлектронике — сварка крышки с основанием полупроводниковых элементов или интегральных схем.

# 1. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

---

Контактная сварка — это процесс образования неразъемных соединений конструкционных материалов в результате их кратковременного нагрева электрическим током и пластического деформирования усилием сжатия.

Соединение свариваемых деталей при контактной сварке (как и при других способах сварки) происходит путем образования связей между атомными агрегатами в зоне контакта этих деталей. При этом для образования физического контакта и активации соединяемых поверхностей затрачивается тепловая и механическая энергия, подводимая извне.

Известные способы контактной сварки классифицируют по ряду признаков:

- 1) по технологическому способу получения соединений — точечная, рельефная, шовная, стыковая;
- 2) по конструкции соединения (нахлесточное или стыковое);
- 3) по состоянию металла в зоне сварки — с расплавлением металла и без расплавления;
- 4) по способу подвода тока — одно- и двусторонняя;
- 5) по роду сварочного тока и форме импульса тока (переменный — промышленной, повышенной и пониженной частоты; постоянный, униполярный — ток одной полярности с переменной силой в течение импульса);
- 6) по числу одновременно выполняемых соединений — одноточечная, многоточечная, сварка одним или несколькими швами и т. д.;
- 7) по наличию дополнительных связующих компонентов (клея, грунта, припоя и др.);
- 8) по характеру перемещения роликов при шовной сварке — непрерывная (с постоянным вращением роликов) или шаговая (с остановкой роликов на время сварки).

## 1.1. Точечная сварка

---

Точечная сварка — способ контактной сварки, при котором детали соединяются по отдельным локальным участкам касания (по ряду точек). При точечной сварке (рис. 1.1, а) детали 1 собирают внахлестку, сжимают усилием  $F_{сж}$  электродами 2, к которым подключен источник электрической энергии 3 (например, сварочный трансформатор, выпрямитель, инвертор и т. д.). Детали нагреваются при кратковременном прохождении сварочного тока  $I_{св}$  через участок электрод—электрод (рис. 1.2, а) до образования зоны 4 совместного взаимного расплавления деталей, называемой ядром. Нагрев зоны сварки сопровождается пластической деформацией металла, вызываемой усилием

сжатия, в зоне контакта деталей (вокруг ядра), где образуется уплотняющий поясок 5. Он предохраняет жидкий металл от выплеска и от взаимодействия с окружающим воздухом, поэтому специальной защиты зоны сварки не требуется. После выключения тока расплавленный металл ядра быстро кристаллизуется, в результате чего образуются металлические связи между соединяемыми деталями (рис. 1.2, б).

Таким образом, формирование соединения при точечной сварке происходит с расплавлением металла.

Нагрев при точечной сварке проводят импульсами переменного тока промышленной частоты 50 Гц (в некоторых случаях повышенной частоты), а также импульсами постоянного или унipoлярного тока.

По способу подвода тока к свариваемым деталям различают двустороннюю и одностороннюю сварку. В первом случае электроды 2 (рис. 1.1, а) подводят к каждой из деталей 1, а во втором — к одной из деталей (например, верхней, рис. 1.1, б). Для повышения плотности тока в точках касания деталей нижнюю деталь прижимают к медной подкладке 6, которая одновременно выполняет роль опоры.

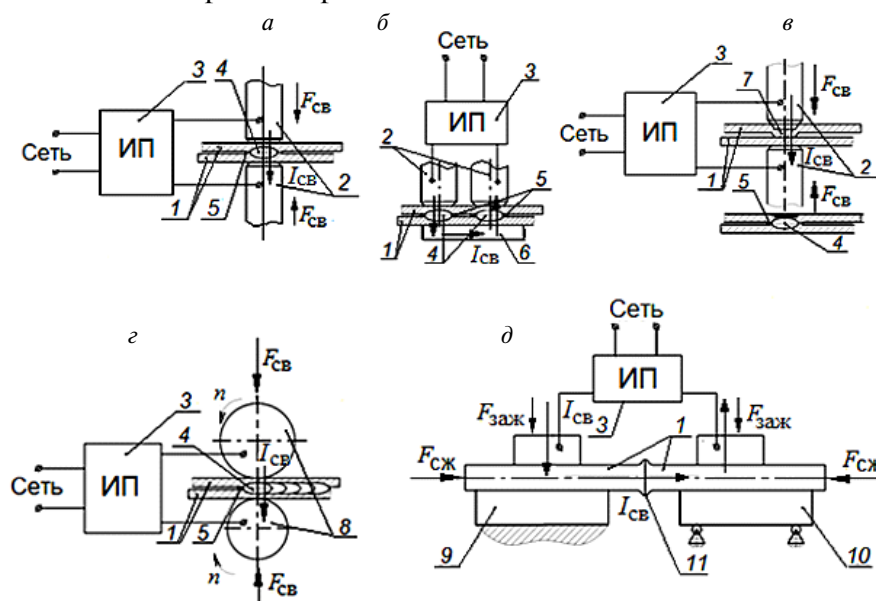


Рис. 1.1. Технологические схемы основных способов контактной сварки

Чаще всего за цикл сварки получают одну точку (одноточечная сварка) и реже — одновременно две (рис. 1.1, б) и более точек (многоточечная сварка). Иногда при точечной сварке применяют комбинированные соединения (клеесварные и сварно-паяные). Клей и припой вводят под нахлестку для повышения прочности и коррозионной стойкости соединений.

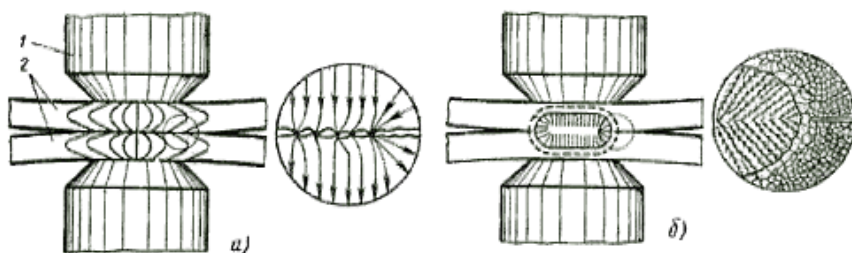


Рис. 1.2. Схема процесса точечной сварки:

- а* — нагрев металла протекающим через участок электрод—электрод током;  
*б* — кристаллизация металла ядра после выключения импульса сварочного тока

## 1.2. Рельефная сварка

Рельефная сварка — разновидность точечной сварки. Основным отличием этого способа является наличие предварительно сформированного рельефа — выступа 7 (рис. 1.1, в) на поверхности одной из деталей, который ограничивает начальную площадь контакта деталей, в результате чего при сварке в этой зоне повышаются плотность тока и скорость тепловыделения. По мере нагрева рельеф под действием сварочного усилия постепенно деформируется до полного исчезновения; на определенном этапе образования соединения, как правило, формируется ядро 4, как при точечной сварке. Для изделий с большой площадью соединяемых поверхностей на одной из деталей выполняют несколько рельефов или один протяженный выступ с замкнутым контуром, например, в виде кольца. В результате, после прохождения сварочного тока, получают одновременно несколько точек или непрерывный плотный шов (контурная рельефная сварка).

## 1.3. Шовная сварка

Шовная сварка — способ получения герметичного соединения (шва) путем образования ряда частично перекрывающихся друг друга точек. Сжатие и перемещение деталей, а также подвод тока осуществляют с помощью вращающихся дисковых электродов — роликов 8 (рис. 1.1, г). Как и при точечной сварке, детали собирают внахлестку и нагревают кратковременными импульсами сварочного тока. Перекрывание точек достигается соответствующим выбором паузы между импульсами тока и скорости вращения роликов. В зависимости от того, вращаются ролики непрерывно при сварке шва или останавливаются на время прохождения сварочного тока, различают непрерывную и шаговую сварку. Шаговая сварка отличается относительно небольшой



производительностью, тем не менее этот способ позволяет уменьшить скорость износа рабочей поверхности роликов и вероятность образования дефектов шва (трещин, раковин) по сравнению с непрерывной сваркой, когда прохождение сварочного тока и кристаллизация литого ядра осуществляются при вращающихся роликах. Известны некоторые разновидности шовной сварки — односторонняя, многошовная (одновременная сварка нескольких швов на одной машине), шовно-стыковая сварка.

#### 1.4. Стыковая сварка

Стыковая сварка — способ контактной сварки, когда детали соединяются по всей площади касания (по всему сечению). Детали (рис. 1.1, д) закрепляются с усилием зажатия  $F_{\text{зж}}$  в токоподводящих зажимах 9, 10, один из которых, например зажим 10, подвижный и соединен с приводом усилия сжатия машины. По степени нагрева металла торцов деталей различают стыковую сварку сопротивлением и оплавлением.

При **стыковой сварке сопротивлением** детали 1 предварительно сжимают усилием  $F_{\text{сж}}$  и включают сварочный источник тока 3. По деталям протекает сварочный ток  $I_{\text{св}}$ , и происходит постепенный нагрев стыка деталей до температуры, близкой, но не превышающей температуру плавления. Затем сварочный ток выключают и резко увеличивают усилие осадки деталей, которые деформируются в стыке. При этом из зоны сварки частично выдавливаются поверхностные пленки, формируется физический контакт и образуется соединение.

**Стыковая сварка оплавлением** отличается тем, что вначале на детали подают напряжение от сварочного источника тока, а затем их сближают. При соприкосновении деталей в отдельных точках (из-за неровностей поверхности) вследствие большой плотности тока металл в месте контактов быстро нагревается с образованием жидких перемычек, которые затем взрывообразно разрушаются. Нагрев торцов деталей происходит за счет их оплавления в результате непрерывного образования и разрушения множественных контактов — перемычек. К концу процесса на торцах образуется сплошной слой жидкого металла. В этот момент резко увеличивают скорость сближения торцов и усилие осадки деталей; торцы смыкаются, большая часть жидкого металла вместе с поверхностными пленками и частью твердого металла выдавливается из зоны сварки, образуя утолщение — грат 11 (рис. 1.1, д). Сварочный ток выключается автоматически во время осадки деталей. В ряде случаев для более равномерного нагрева деталей по сечению и получения однородных свойств соединений торцы подогревают до начала оплавления током, протекающим при многократном кратковременном замыкании торцов, как при сварке сопротивлением.

Стыковую сварку как сопротивлением, так и оплавлением относят по состоянию металла в зоне сварки к сварке в твердом состоянии, хотя в отдельных случаях, особенно при стыковой сварке оплавлением деталей больших сечений, стыковое соединение формируется в твердожидкой фазе.

Получение сварных конструкций с заданными эксплуатационными свойствами обеспечивается соответствующей технологией и оборудованием.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ, ШОВНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ

---

Для получения качественных соединений необходимо знание физико-химических процессов, протекающих при их формировании, которые и составляют теоретическую основу технологии. В целях анализа формирования соединения его условно можно расчленить на отдельные этапы и выделить физические процессы, способствующие образованию межатомных связей в контакте заготовок и определяющие свойства полученных соединений.

Для всех процессов контактной сварки характерно малое время их протекания при большом сварочном токе и усилии сжатия деталей, что обеспечивает интенсивный нагрев, локальное плавление металла и значительную пластическую деформацию в месте соединения, а в ряде случаев — образование межатомных связей в твердом состоянии без участия жидкого металла.

Необходимым условием формирования соединения для большинства способов является образование общей зоны расплавления заданных размеров, что обеспечивает важнейшие эксплуатационные свойства — прочность и герметичность соединения. Размеры ядра или шва регламентируются ГОСТ 15878—79.

### 2.1. Общая схема формирования соединения при точечной, шовной и рельефной сварке

---

При рассматриваемых способах сварки образование соединения происходит в значительной мере по единой схеме, включающий три этапа I—III (рис. 2.1).

#### 2.1.1. Первый этап

Этап начинается с момента обжатия деталей, вызывающего упруго-пластическую деформацию микронеровностей в контактах электрод—деталь и деталь—деталь, в результате чего устанавливается начальный контакт. Последующее включение тока и нагрев металла снижают сопротивление пластической деформации, что способствует выравниванию микрорельефа, разрушению поверхностных пленок и формированию электрического контакта.

При рельефной сварке на данном этапе начинается осадка рельефа.

Деформация нагретого металла происходит преимущественно в зазор между деталями, в результате чего образуется уплотняющий пояс.

### 2.1.2. Второй этап

Этот этап начинается с момента расплавления металла. На протяжении данного этапа образуется ядро. По мере прохождения тока ядро растет до максимальных размеров по высоте и диаметру. В процессе расплавления металла и роста ядра происходит перемешивание металла, удаление поверхностных пленок к его периферии и образование металлических связей в жидкой фазе. Продолжаются процессы пластической деформации. В процессе нагрева зоны сварки происходит тепловое расширение металла.

При рельефной сварке в конце этапа наблюдается практически полная осадка рельефа.

### 2.1.3. Третий этап

Заключительный этап, который начинается с выключения тока, характеризуется охлаждением металла зоны сварки и кристаллизацией жидкого ядра. Таким образом, образуется общее для соединяемых деталей литое ядро. При охлаждении в результате уменьшения объема металла в зоне сварки возникают остаточные напряжения. В целях снижения уровня этих напряжений и предотвращения образования усадочных трещин и раковин требуется приложение значительных усилий.

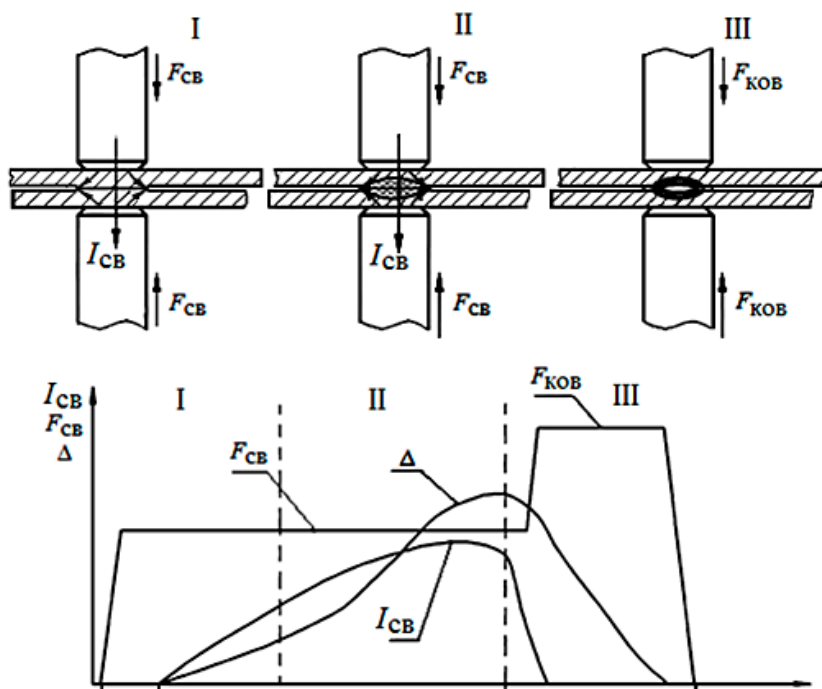


Рис. 2.1. Этапы образования соединения при точечной сварке:

$I_{CB}$  — кривая сварочного тока;  $\Delta$  — деформации;  
 $F_{CB}$  — сварочное усилие;  $F_K$  — ковальное усилие

Для получения следующего соединения цикл через определенную паузу вновь повторяется.

При шовной сварке за счет теплопередачи от предыдущих точек процессы пластической деформации при сварке последующих участков облегчаются на всех этапах. Снижается скорость кристаллизации ядра, что приводит к уменьшению остаточных напряжений.

## 2.2. Физические процессы, протекающие при точечной, шовной и рельефной сварке

---

Физические процессы в зависимости от их роли в формировании соединения условно разделяют на нижеследующие.

Основные:

- нагрев и кристаллизация металла;
- пластическая деформация;
- удаление поверхностных пленок непосредственно при сварке в результате электромагнитного перемешивания расплавленного металла.

Сопутствующие:

- тепловое расширение металла;
- воздействие термомодеформационного цикла на свойства сварных соединений;
- образование остаточных напряжений;
- массоперенос в контакте электрод—деталь.

На основании многолетнего практического опыта и теоретических представлений предложены различные циклограммы сварки, обеспечивающие получение качественных сварных соединений различных конструкционных материалов. Однако все они имеют общую основу, поэтому для объяснения взаимосвязи основных и сопутствующих процессов целесообразно рассмотреть один из типовых электротермомодеформационных циклов сварки (см. рис. 2.1).

На первом этапе сопутствующие процессы вследствие относительно малой деформации и низкой температуры зоны сварки не получают большого развития. При появлении на втором этапе расплавленного ядра резко возрастает тепловое расширение металла, появляется опасность выплеска, вследствие теплопроводности отмечается нагрев околошовной зоны, изменение исходной структуры металла, массоперенос в контакте электрод—деталь. На третьем этапе при охлаждении металла происходит кристаллизация металла ядра, образование литой структуры и значительных остаточных напряжений, продолжается теплопередача в околошовную зону и изменение структуры металла в этой части соеди-

нения. На степень развития сопутствующих процессов и изменения первоначальных свойств металла можно достаточно эффективно влиять, например, за счет уменьшения скорости нагрева (роста сварочного тока), изменения продолжительности импульса сварочного тока и увеличения усилия на стадии охлаждения.

Высокое качество сварки и максимальная производительность процесса для требуемой толщины, формы и материала изделий определяется правильностью выбранного режима сварки.

**Режим сварки** — совокупность электрических, механических и временных параметров технологического процесса, обеспечиваемых сварочным оборудованием для получения качественного соединения.

Качество соединений во многом зависит и от других составляющих технологического процесса: формы электродов, качества сборки и подготовки поверхности, техники сварки, характеристик сварочного оборудования, системы контроля и других конструктивно-технологических факторов, которые более подробно рассмотрены в последующих разделах.

## 2.3. Процессы нагрева металла при точечной, шовной и рельефной сварке

### 2.3.1. Источники теплоты при сварке

Нагрев и плавление металла происходят за счет выделения теплоты на электрических сопротивлениях при прохождении через них электрического тока. Общее количество теплоты, выделяемое между электродами за время сварки ( $t_{св}$ ), определяется законом Джоуля — Ленца

$$Q_{э\text{э}} = \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t) r_{э\text{э}}(t) dt, \quad (2.1)$$

где  $i_{св}(t)$  — мгновенное значение сварочного тока, обычно меняющееся в процессе сварки;  $r_{э\text{э}}(t)$  — общее сопротивление металла между электродами в момент времени  $t < t_{св}$ .

При сварке двух деталей из одного и того же металла и равной толщины

$$r_{э\text{э}} = 2r_{\text{д}} + 2r_{\text{эд}} + r_{\text{дд}}, \quad (2.2)$$

где  $r_{\text{д}}$  — собственное активное сопротивление деталей;  $r_{\text{эд}}$  — контактное сопротивление между электродом и деталью;  $r_{\text{дд}}$  — контактное сопротивление между деталями (рис. 2.2).

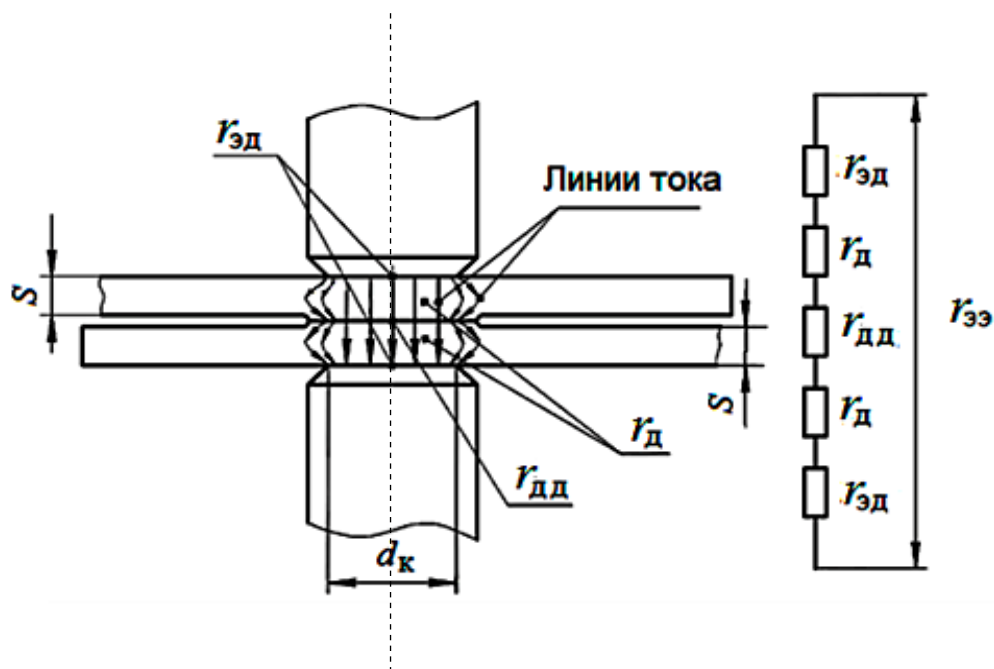


Рис. 2.2. Сопротивление участка электрод—электрод

Общим контактным сопротивлением ( $r_k$ ) называют сумму контактных сопротивлений на участках электрод—деталь и деталь—деталь:

$$r_k = 2r_{эд} + r_{дд}.$$

Площадь контакта (электрод — деталь и деталь — деталь) как в течение одного цикла сварки, так и при выполнении некоторого количества точек претерпевает изменения. Условный диаметр контакта  $d_k$ , изменяющийся в процессе сварки, к концу цикла становится равен диаметру рабочей поверхности  $d_3$ . На электродах с плоской рабочей поверхностью края площадки в процессе работы постепенно скругляются в результате явлений износа. Диаметр контакта у электродов со сферической рабочей поверхностью значительно изменяется в процессе сварки вследствие пластической деформации свариваемого металла примерно в 1,5–2 раза с момента включения до момента выключения тока. При выполнении большого количества сварных точек на рабочей поверхности этих электродов из-за процессов деформации и износа образуется плоская площадка, а площадь контактирующей поверхности приближается к поперечной площади условного цилиндра с диаметром  $d$ , равным  $d_3$ . Несмотря на значительную разницу первоначальной формы электродов (плоскоконической и сферической), наблюдается тенденция к образованию наиболее устойчивой конфигурации рабочей поверхно-

сти с плоской площадкой на рабочей части и плавным переходом к цилиндрической части электрода.

Уровень контактных сопротивлений и собственного сопротивления деталей, а также динамика их изменения в процессе сварки определяет характер тепловыделения и формирование соединения. Влияние контактных и собственных сопротивлений на процесс тепловыделения целесообразно исследовать, представив уравнение (2.1) в следующем виде:

$$Q_{\text{эз}} = \int_0^{t_{\text{св}}} i_{\text{св}}^2(t) r_{\text{к}}(t) dt + \int_0^{t_{\text{св}}} i_{\text{св}}^2(t) 2r_{\text{д}}(t) dt. \quad (2.3)$$

На сопротивления  $r_{\text{к}}$  и  $r_{\text{д}}$  влияют:

- свойства свариваемых материалов;
- форма соединяемых деталей;
- усилие сжатия;
- неравномерность нагрева;
- состояние поверхности и т. д.

Составляющие электрических сопротивлений (2.2) рассматривают в условиях *холодного* (до включения сварочного тока) и *горячего* (при протекании сварочного тока) состояний контакта.

Холодный контакт существенного влияния на процессы, протекающие при сварке, не оказывает; в этом состоянии формируются лишь начальные контактные площадки.

Для представления процессов, протекающих при сварке, наиболее актуально исследование горячего состояния контакта (на этапе нагрева) и особенно знание конечного значения его сопротивления, которое при определенных условиях сварки, как правило, стабилизируется и определяется в конечном итоге собственным сопротивлением деталей. В конце цикла нагрева при высоких значениях температуры и давления (250–600 МПа) роль контактных сопротивлений в формировании соединения в значительной степени снижается.

Электрические поля в разных зонах участка электрод–электрод (2.2) взаимосвязаны, поэтому разделение сварочного контакта на зоны в значительной мере условно. Аналитически учесть всю совокупность факторов, влияющих на сопротивления различных зон, чрезвычайно сложно, поэтому в большинстве случаев используют экспериментальные данные или упрощенные приближенные расчеты.

### 2.3.2. Контактные сопротивления

Контактные сопротивления сосредоточены в узкой области прилегания деталь–деталь и электрод–деталь.

Экспериментально величину контактных сопротивлений определяют, пропуская небольшой (сигнальный) ток через металлические детали, сжатые



усилием  $F$ , измеряя падение напряжения на участках равной длины в области контакта и на самих деталях. При холодных деталях падение напряжения на участке деталь—деталь много больше падения напряжения на собственном сопротивлении деталей  $\Delta u_{\text{дд}} \gg \Delta u_{\text{д}}$  ( $\Delta u = Ir$ ), следовательно,  $r_{\text{к}}$  обычно составляет большую часть от  $r_{\text{эз}}$ . Поэтому для оценки качества состояния поверхности деталей можно воспользоваться измерением  $r_{\text{эз}}$ , считая его тождественным значению  $r_{\text{к}}$ .

Наличие контактных сопротивлений связано с ограниченностью площади электрического контакта из-за неровной поверхности деталей и электродов, а также из-за различных неэлектропроводных поверхностных образований: оксидных и гидрооксидных пленок, адсорбированной влаги, масел, продуктов коррозии, пыли, адсорбированных газов и т. п. (рис. 2.3, а). Поэтому фактическая площадь контакта ( $S_{\text{ф}}$ ) до нагрева деталей значительно меньше контурной площади контакта ( $S_{\text{к}}$ ). Контурная площадь определяется диаметром контакта  $d_{\text{к}}$  и зависит от диаметра электрода  $d_{\text{э}}$  (в контакте электрод—деталь) или диаметром уплотняющего пояса  $d_{\text{п}}$  (в контакте деталь—деталь). В этих условиях имеет место так называемый «ситовый» характер проводимости — ток проходит по отдельным микроконтактам ( $S_{\text{ф}}$ ) (рис. 2.3, б). Влияние состояния поверхности деталей на контактное сопротивление очень велико.

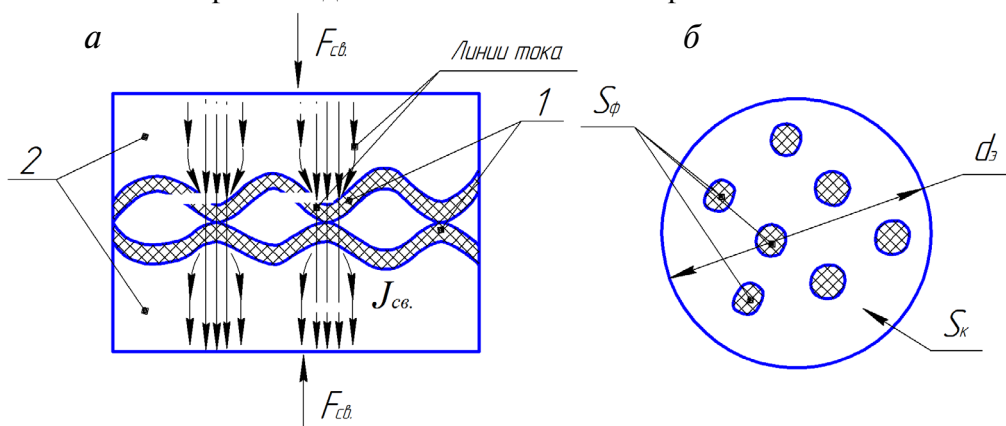


Рис. 2.3. Схема образования контактного сопротивления:

- а — распределение тока в зоне соприкосновения холодных деталей (1 — неэлектропроводные и малоэлектропроводные включения на поверхности металла; 2 — свариваемые детали); б — распределение микроконтактов на контактной поверхности металла

Например, контактное сопротивление (по результатам эксперимента) различно обработанных пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, сжатых электродами ( $d_{\text{э}} = 10$  мм) с усилием 2000 Н, составляло (мкОм):

- покрытых ржавчиной и окалиной 300000;
- покрытых окалиной 80000;

- обработанных режущим инструментом 1200;
- очищенных наждачным кругом и шлифованных 1000;
- травленых 300.

Контактное сопротивление деталей уменьшается при росте усилия сжатия, так как увеличивается  $S_{\phi}$  за счет смятия выступов, увеличения их числа и разрушения поверхностных пленок (например, на рис. 2.4 показана область разброса значений  $r_{\Sigma}$  в зависимости от приложенного усилия).

При зачистке поверхности сопротивление  $r_{\Sigma}$  уменьшается вследствие удаления неэлектропроводных поверхностных образований, с ростом давления сопротивление падает, а затем в значительной степени стабилизируется из-за образования устойчивой контактной площадки. На рис. 2.5 представлена зависимость сопротивления на участке электрод—электрод  $r_{\Sigma}$  от способа подготовки поверхности, значительная разница в крутизне кривых объясняется различиями в величине шероховатости поверхности при использовании различных методов обработки.

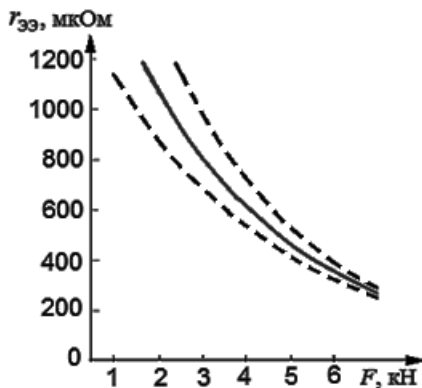


Рис. 2.4. Зависимость сопротивления участка электрод—электрод от усилия сжатия  $F$ , кН (сталь X15H5Д2Т, толщина 1+1 мм, сжатие электродами со сферической рабочей поверхностью с радиусом сферы 75 мм)

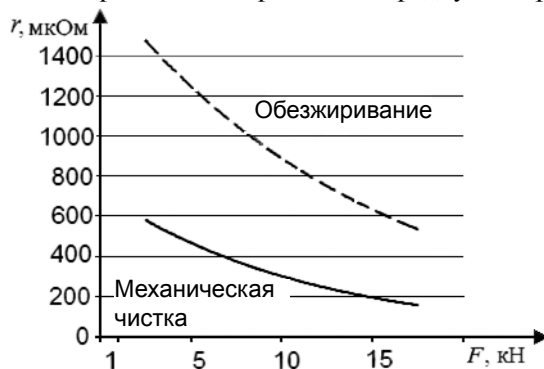


Рис. 2.5. Зависимость общего сопротивления  $r_{\Sigma}$  от усилия сжатия  $F$  при разных способах зачистки (титановый сплав ВТ 6, толщина образцов 2+2 мм)

Зависимость контактных сопротивлений холодных деталей от усилия сжатия  $F$  в некоторых случаях оценивают по эмпирической зависимости

$$r_{\text{дд}} = r_{\text{ддо}}/F^{\alpha}, \quad (2.4)$$

где  $r_{\text{ддо}}$  — постоянный коэффициент, равный

- для стали (5–6)  $10^{-3}$ ;
  - алюминиевых сплавов (1–2)  $10^{-3}$ ;
- $\alpha$  — показатель степени, равный:
- для стали 0,7;
  - алюминиевых сплавов 0,8.

Приведенная выше формула может использоваться для расчетов только в первом приближении, так как не учитывает состояния поверхности деталей и составлена в предположении, что  $r_{\text{дд}}$  не зависит от размеров деталей. В действительности размеры  $S_{\text{ф}}$  и значения  $r_{\text{дд}}$  и  $r_{\text{эд}}$  зависят от твердости металлов. В контакте «твердого» металла с электродом из «мягкого» сплава  $S_{\text{ф}}$  больше, а  $r_{\text{эд}}$  меньше, чем в контакте свариваемых деталей с относительно высокой твердостью.

При обжати хорошо очищенных деталей из низкоуглеродистой стали электродами с высокой электропроводимостью принимают  $r_{\text{эд}} \ll 0,5r_{\text{дд}}$ . При сварке алюминиевых сплавов  $r_{\text{эд}}$  отличается от  $r_{\text{дд}}$  менее значительно.

Более точные значения  $r_{\text{дд}}$  и  $r_{\text{эд}}$  получают путем непосредственного измерения электрических сопротивлений. При повороте деталей, сжатых электродами, на небольшой угол относительно электродов резко снижается  $r_{\text{эд}}$ , а при взаимном повороте деталей —  $r_{\text{дд}}$ . Сравнивая исходное значение  $r_{\text{эд}}$  с полученными после поворотов, можно вычислить значения  $r_{\text{дд}}$  и  $r_{\text{эд}}$ .

После включения сварочного тока микроконтакты интенсивно нагреваются, снижается сопротивление металла пластической деформации, облегчаются условия разрушения пленок, и при определенных критических температурах  $T_{\text{кр}}$ , характерных для данного металла,  $r_{\text{к}}$  резко снижается ( $r_{\text{дд}}$  практически до нуля, а  $r_{\text{эд}}$  до относительно малой величины). В конечном итоге сопротивление  $r_{\text{эз}}$  участка электрод–электрод определяется в основном сопротивлением самих деталей. Значения  $T_{\text{кр}}$  для сталей составляют 600–700 °С, алюминиевых сплавов 400–450 °С и достигаются при обычном цикле точечной сварки спустя 0,1–0,2  $t_{\text{св}}$ . При увеличении  $F_{\text{св}}$  величина  $T_{\text{кр}}$  несколько снижается.

Экспериментально показано (методом калориметрирования), что доля теплоты, выделяемой на сопротивлении  $r_{\text{дд}}$ , обычно (при сварке деталей толщиной 1 мм) не превышает 5 % общей энергии, генерируемой в зоне сварки. Сопротивление  $r_{\text{дд}}$  присутствует относительно короткое время, тем не менее оказывает существенное влияние на последующий нагрев, особенно при сварке деталей малых толщин, где высота микрорельефа поверхности соизмерима с толщиной деталей. Первоначально нагретая зона контакта, обладающая повышенным сопротивлением, способствует большему

тепловыделению. Однако при значительном повышении сопротивления  $r_{\text{дд}}$  тепловыделение становится нестабильным, а при больших значениях  $r_{\text{эд}}$  резко снижается стойкость электродов.

Для стабилизации тепловыделения, размеров соединений и увеличения стойкости электродов перед сваркой необходимо выполнять подготовку поверхностей деталей в целях удаления толстых поверхностных пленок и различных загрязнений, обеспечивая тем самым достаточно низкие и стабильные значения контактных сопротивлений. Для этих же целей часто рекомендуется применение повышенных сварочных усилий.

### 2.3.3. Собственное сопротивление деталей

Собственное сопротивление распределено определенным образом в объеме деталей. На собственном сопротивлении  $r_{\text{д}}$  при прохождении через него электрического тока выделяется основное количество теплоты — второй член уравнения (2.3) для теплоты  $Q_{\text{эз}}$ . До включения тока (холодное состояние контакта) фактическая площадь  $S_{\text{ф}}$  и диаметр контакта  $d_{\text{к}}$  и соответственно уровень сопротивления  $r_{\text{д}}$  неопределенны, так как отсутствует однозначная зависимость  $S_{\text{ф}}$ ,  $d_{\text{к}}$  от сварочного усилия  $F_{\text{св}}$  и состояния поверхности. При расчете тепловых процессов удобно рассматривать сопротивление деталей в конце их нагрева  $r_{\text{дк}}$  (горячее состояние контакта). Для упрощения расчета  $2r_{\text{дк}}$  (при сварке двух деталей одинаковой толщины  $s$ ) используют условную схему термодформационного состояния металла зоны сварки (рис. 2.6, а). В частности, считают, что  $d_{\text{к}} = d_{\text{п}}$  (где  $d_{\text{п}} \leq 1,2d_{\text{э}}$  — диаметр уплотняющего пояса), а контактные сопротивления  $r_{\text{дд}}$  и  $2r_{\text{эд}}$  равны нулю и  $S_{\text{ф}} = S_{\text{к}}$ .

Рассматриваемое сопротивление представляют как сумму сопротивлений двух условных пластин 1 и 2 одинаковой толщины, каждая из которых нагрета до некоторой средней температуры  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 2.6, б). Тогда искомое сопротивление определяется следующей формулой:

$$2r_{\text{дк}} = \frac{4Ak_{\text{п}}s_1(1+2)}{\pi d_{\text{э}}^2}.$$

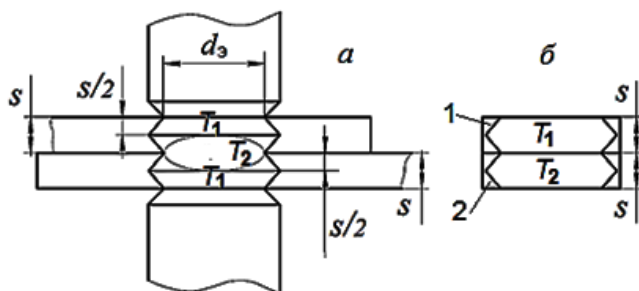


Рис. 2.6. Реальное соотношение размеров и температур (а) и расчетная схема электрического сопротивления к концу цикла сварки (б)

Удельные электросопротивления деталей  $\rho_1$  и  $\rho_2$  зависят:

- от рода металла;
- вида его термомеханической обработки;
- температуры.

Значения  $\rho_1$  и  $\rho_2$  определяют соответственно для температур  $T_1$  и  $T_2$ . При сварке деталей из низкоуглеродистых сталей  $T_1$  и  $T_2$  принимают равными 1200 и 1500 °С, а для алюминиевых сплавов — 450 и 630 °С. Коэффициент  $k_p$  учитывает неравномерность нагрева деталей: для сталей  $k_p = 0,85$ , для алюминиевых и магниевых сплавов — 0,9.

Коэффициент  $A$  равен отношению  $r_d/r_{ц}$ , где  $r_{ц}$  — электрическое сопротивление цилиндра между электродами высотой  $s$  и диаметром  $d_3$ . За счет шунтирования тока в массу детали сопротивление  $r_d$  всегда меньше сопротивления  $r_{ц}$ , а следовательно, коэффициент  $A < 1$ . Кроме того, коэффициент  $A$  зависит от отношения  $d_3/s$  (рис. 2.7). Чем меньше это отношение, тем меньше  $A$ , тем больше разница между  $r_d$  и  $r_{ц}$ . При сварке деталей толщиной 0,8–3 мм  $A \leftrightarrow 0,8$ .

Расчетные значения сопротивлений, как правило, не превышают пределов инженерной ошибки и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

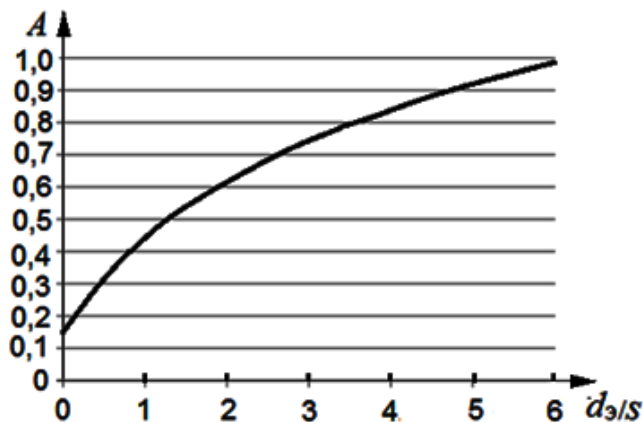


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента  $A$  от соотношения  $d_3/s$

### 2.3.4. Общее сопротивление участка электрод–электрод

При протекании сварочного тока общее сопротивление существенно изменяется.

Первый период (I) характеризуется резким спадом  $r_{эз}$  за счет снижения  $r_{дд}$  и  $2r_{эд}$ , несмотря на незначительное увеличение  $2r_d$  вследствие роста температуры металла в области контакта деталь–деталь. В течение второго периода (II)  $r_{эз}$  практически определяется собственным сопротивлением деталей  $2r_d$  (так как  $r_{дд} = 0$ , а  $2r_{эд}$  очень мало). Небольшой спад  $r_{эз}$  определяется в этом периоде увеличением площади электрических контактов, диаметры которых к концу нагрева достигают значений  $d_3$  и затем  $d_n$  (рис. 2.8).

Сопоставляя различные кинетические кривые изменения  $r_{\text{эз}}$ , а также конечные значения  $r_{\text{ээк}}$  при сварке одинаковых и разных материалов и соединений, можно в первом приближении судить об изменениях плотности тока  $j$  и общей стабильности процесса сварки.

В общем случае характер изменения  $r_{\text{эз}}$  зависит:

- от свойств металла;
- толщины деталей;
- режима сварки;
- формы импульса тока;
- размеров ядра;
- формы рабочей поверхности электродов и т. п.

За цикл точечной сварки (например, стали 08кп) удельное сопротивление  $\rho$  увеличивается в 5–7 раз. Но рост удельного сопротивления в значительной степени компенсируется увеличением площади контакта. В результате значение сопротивления  $r_{\text{эз}}$  мало изменяется в процессе сварки (рис. 2.8). Кинетика изменения удельного сопротивления при изменении температуры для разных металлов и сплавов имеет достаточно существенные различия. Так, при сварке некоторых сталей и сплавов (например, 12Х18Н10Т, Д16 и ОТ 4) удельное сопротивление  $\rho$  увеличивается за время сварки только в 1,5–2 раза, в то время как площадь электрических контактов значительно увеличивается, поэтому в некоторых случаях имеет место более значительное снижение  $r_{\text{эз}}$  в области II, чем при сварке низкоуглеродистых сталей. У металлов и сплавов с низким удельным электросопротивлением (сплавы на основе меди и алюминия) значение  $r_{\text{эз}}$  значительно меньше, чем для сплавов на основе железа и ряда других металлов. С ростом толщины деталей общее сопротивление за счет увеличения площади контакта в процессе сварки и конечное его значение  $r_{\text{ээк}}$  заметно снижаются.

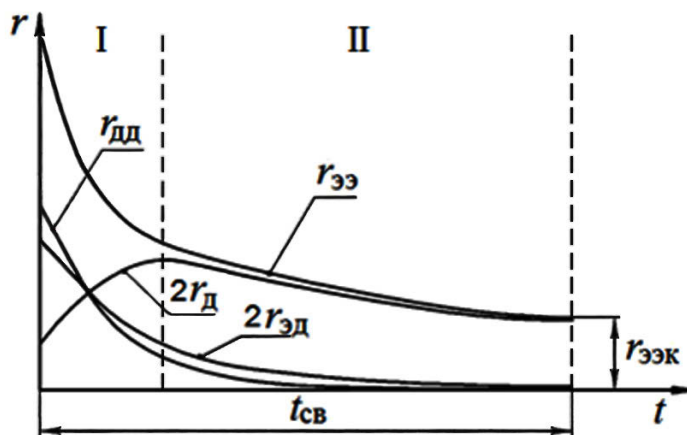


Рис. 2.8. Кинетика изменения электрических сопротивлений при точечной сварке

Увеличение диаметра ядра (при сварке деталей одной толщины), достигаемое повышением силы тока и времени сварки, приводит, как правило, к снижению  $r_{\text{эз}}$  и  $r_{\text{ээк}}$ . Например,  $r_{\text{ээк}}$  для диаметров электрода  $d_{\text{э}}$ , равных 4, 6 и 8 мм, составляет соответственно 200, 150 и 80 мкОм (сталь 12Х18Н10Т толщиной 1,5 + 1,5 мм).

При точечной сварке используются электроды как со сферической, так и плоской рабочей поверхностью. Сварка электродами со сферической поверхностью отличается меньшими размерами контакта на первом этапе, соответственно большей плотностью тока и большей скоростью тепловыделения. Зона расплавления возникает раньше, чем при сварке электродами с плоской поверхностью. Поэтому период I (рис. 2.8) характерен меньшей длительностью, а значение сопротивления  $r_{\text{эз}}$  в этом периоде заметно выше. Характер изменения  $r_{\text{эз}}$  в течение периода II для обоих типов электродов примерно одинаков (рис. 2.8). Тем не менее на протяжении всего цикла сварки среднее значение  $r_{\text{эз}}$  для электродов со сферической поверхностью на 10–15 % выше. Но среднее значение  $I_{\text{св}}$  и конечный диаметр ядра изменяются незначительно. С увеличением сопротивления  $Z_{\text{кз}}$  сварочной машины эти изменения становятся еще менее существенными. При сварке электродами со сферической поверхностью после выполнения большого числа точек их рабочая поверхность постепенно выравнивается, и появляется практически плоская площадка, в связи с чем начальное сопротивление  $r_{\text{эз}}$  заметно уменьшается.

При рельефной сварке кинетика изменения сопротивления  $r_{\text{эз}}$  значительно отличается от кинетики при точечной сварке. В течение I периода (рис. 2.9) происходит резкое падение сопротивления из-за быстрой деформации нагреваемого выступа и увеличения площади контакта. Затем в периоде II значение сопротивления  $r_{\text{эз}}$  стабилизируется, далее в новом III периоде вновь уменьшается, что связано с расширением контактов при образовании ядра. На конечной стадии диаметры контактов и тепловое состояние металла стабилизируются, и  $r_{\text{эз}}$  изменяется незначительно. Величина  $r_{\text{ээк}}$  при рельефной сварке меньше, чем при точечной, из-за большего размера контактов.

При шовной сварке герметичным швом вследствие достаточно высокой начальной температуры последующей точки заметно снижается роль контактных сопротивлений  $r_{\text{дд}}$  и  $2r_{\text{эд}}$ . В начале цикла при сварке второй точки и последующих участков шва контактные сопротивления  $r_{\text{к}}$  сравнительно малы из-за пониженного сопротивления пластическим деформациям, а собственное сопротивление  $r_{\text{д}}$  деталей повышено за счет высокой температуры от предыдущих точек, поэтому полное сопротивление деталей значительных изменений не претерпевает и монотонно уменьшается вплоть до момента выключения тока. Конечные значения  $r_{\text{ээк}}$  из-за увеличенной площади контактов заметно меньше, чем при точечной сварке.

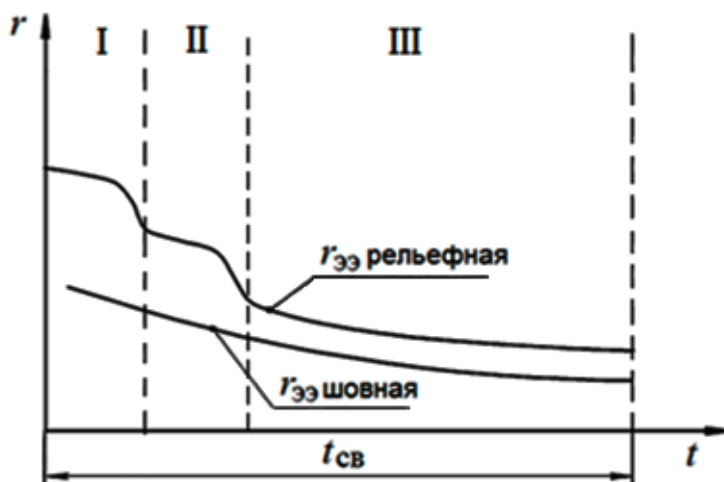


Рис. 2.9. Кинетика изменения общих электрических сопротивлений при рельефной и шовной сварке

### 2.3.5. Электрические и температурные поля

Электрическое поле сварочного тока наравне с температурным полем нагрева участков свариваемых деталей и электродов определяют характер основных и сопутствующих процессов при сварке. Количественное описание процессов позволяет однозначно определить тепловыделение, пластические деформации, характер охлаждения и кристаллизации, а следовательно, прогнозировать образование возможной структуры, характер и уровень остаточных напряжений и т. д.

Электрическое поле в физике принято характеризовать распределением потенциалов отдельных точек проводника, при контактной сварке — падениями напряжения относительно нулевой точки источника питания. Графически электрическое поле изображают в виде системы эквипотенциальных линий (рис. 2.10, а) или в виде совокупности силовых линий сварочного тока (рис. 2.10, б). Линии тока идут от участков проводника с высоким потенциалом к участкам с низким потенциалом. В каждой точке силовые линии тока ориентированы нормально относительно эквипотенциальных линий, а их плотность пропорциональна местным значениям электропроводимости проводника. Значения потенциалов и плотности тока в различных точках деталей и электродов имеют существенные различия. Поэтому электрическое поле при сварке неоднородно. Неоднородность электрического поля определяется действием геометрического, температурного и магнитоэлектрического факторов.



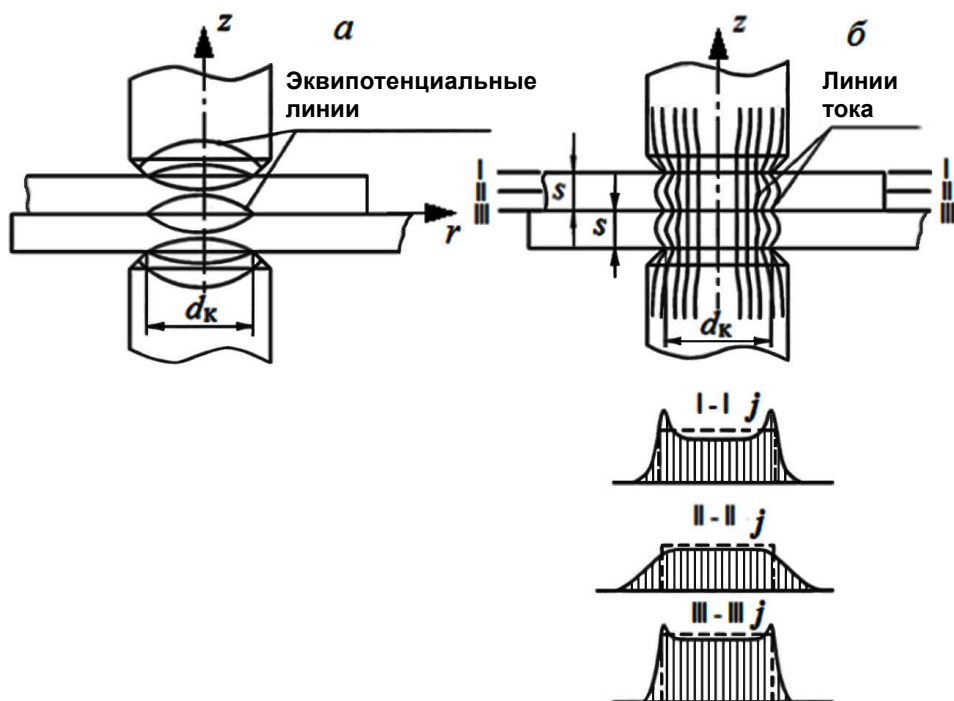


Рис. 2.10. Электрическое поле при точечной сварке

Геометрический фактор обусловлен значительной разницей в размерах контактов и деталей и явлением шунтирования тока. Электрическое поле симметрично относительно оси  $Z$ . Поле плотности тока определяется абсолютными значениями потенциалов и электрическими сопротивлениями в различных точках зоны сварки и электродов. Наибольшие плотности тока наблюдаются (рис. 2.10, б) в сечениях I—I и III—III, вблизи границ контактов в результате частичного распределения (растекания) тока в деталях и электродах и концентрации на границах. В сечении II—II плотность тока практически одинакова в окрестностях оси  $Z$  и монотонно убывает до границ контакта. Неравномерность электрического поля возрастает с уменьшением отношения  $d_k/s$ . Например, при  $d_k/s = 3,3$  около 25 % тока протекает вне поверхности цилиндра с основанием  $d_s$ , а при  $d_k/s = 5$  — лишь 15 %. Характер поля зависит также от диаметра электрода, расположения в нем охлаждающего канала.

Температурный фактор проявляется в обтекании током более нагретых участков соединения, отличающихся повышенным сопротивлением, в условиях неравномерного температурного поля и распределения электрических сопротивлений зоны сварки. Наиболее существенно это явление проявляется при наличии расплавленного ядра (рис. 2.11), удельное электрическое

сопротивление которого в 1,5–2 раза больше, чем окружающего его твердого металла. Плотность тока в сечении II–II ( $z = s/2$ ) вблизи границ ядра заметно повышается (на 25 % и более) по сравнению с рассмотренным ранее случаем равномерно нагретых деталей и снижается над ядром. Во многом аналогичная картина отмечается и в сечении III–III ( $z = 0$ ). Увеличение плотности тока в области уплотняющего пояска способствует его расширению в направлении оси  $r$  по мере роста диаметра ядра.

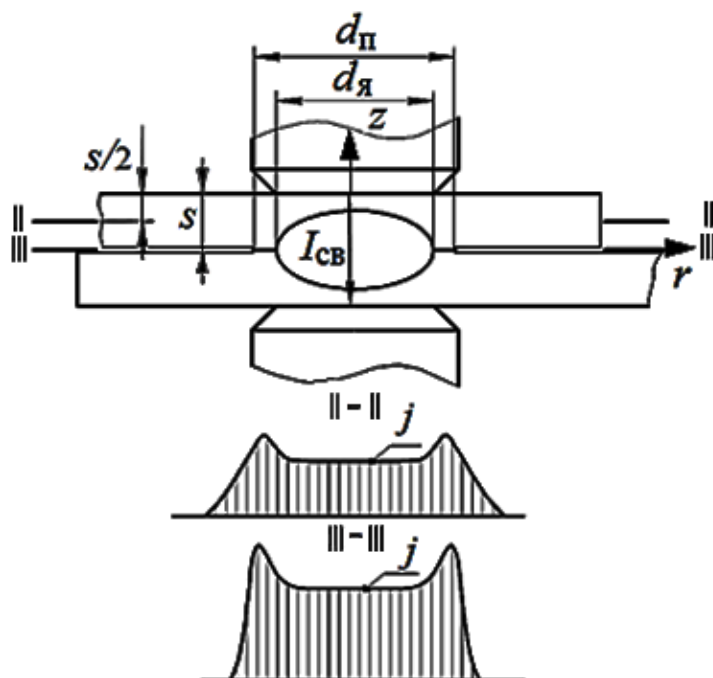


Рис. 2.11. Распределение плотности тока в сечениях детали при наличии жидкого ядра

Магнитоэлектрический фактор, связанный с проявлением поверхностного эффекта (переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое), эффекта близости (сжатие линий тока собственным магнитным полем) и т. п., мало влияет на характер электрического поля, за исключением случая сварки токами повышенной частоты. При шовной сварке электрическое поле носит сложный характер в связи с шунтированием тока в ранее сваренные точки.

Температурное поле — совокупность температур в различных точках свариваемых деталей в отдельные моменты времени. Это поле формируется в результате протекающих процессов тепловыделения и теплопередачи и изменяется по ходу сварки. Выделение теплоты вызвано действием ряда источников.

Основной источник — источник, объемно распределенный в деталях на участке электрод—электрод с удельной мощностью  $j^2\rho$  ( $j$  — плотность тока).

Второстепенные источники тепла — плоские источники с удельной мощностью  $j^2r_{\text{дк}}/(\pi d_{\text{к}}^2/4)$  и  $j^2r_{\text{эж}}/(\pi d_{\text{к}}^2/4)$  (где  $d_{\text{к}}$  — диаметр контакта), связанные с генерированием тепловой энергии на контактных сопротивлениях.

Еще один плоский источник тепла обусловлен эффектом Пельте. Эффект проявляется в выделении или поглощении тепла на границах фаз (например, твердая и жидкая фазы) либо в контакте разнородных материалов. Сущность данного эффекта: если ток направлен так, что электроны переносятся из металла, где их энергия выше, то тепловая энергия выделяется.

Температурное поле при точечной и шовной сварке характеризуется чрезвычайно быстрым изменением температур во времени и весьма значительной неравномерностью.

Температурное поле при точечной сварке (рис. 2.12) симметрично относительно оси  $r$ , и температура зависит лишь от двух координат —  $z$  и  $r$ . Для описания поля температур обычно используют изотермы, расположенные в проходящих через ось  $r$  сечениях. В силу указанной симметрии изотермы в сечениях, параллельных поверхности деталей, имеют форму окружностей. При сварке деталей одинаковой толщины плавление металла происходит в области, примыкающей к контакту деталей (в наиболее горячей зоне) и отличающейся повышенной плотностью тока, сравнительно малыми градиентами температур и относительно небольшим теплообменом с электродами.

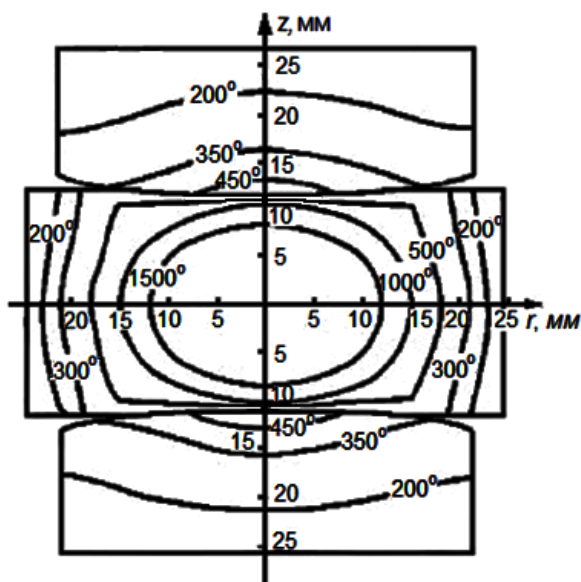


Рис. 2.12. Расчетное температурное поле к моменту выключения тока (точечная сварка листов из низкоуглеродистой стали толщиной 12 + 12 мм)

Ядро возникает в области контакта деталь — деталь, где достигается наибольшая плотность тока и в меньшей степени сказывается теплообмен с электродами. Расплавленное ядро образуется лишь спустя некоторое время с момента включения тока, составляющее в среднем  $(0,3-0,5) \leq t_{\text{св}}$ . Затем ядро растет, достигая определяемых режимом размеров. При высокой скорости нарастания тока (большой крутизне фронта нарастания импульса) ядро увеличивается быстрее. Обычно температурное поле рассматривают в момент выключения тока, так как в это время температуры, как правило, достигают максимальных значений. Около ядра изотермы представлены в виде замкнутых кривых линий, на удалении от него — это почти прямые линии, перпендикулярные оси  $r$ .

Наибольший градиент температур наблюдается в направлении оси  $z$  и может достигать  $100000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ . Весьма характерна максимальная температура в контакте электрод—деталь. Обычно считают, что она достигает  $0,5T_{\text{пл}}$  свариваемого металла. Эта температура возрастает при увеличении длительности импульса и теплопроводности (температуропроводности) металла. На рис. 2.12 приведено положение изотерм при точечной сварке низкоуглеродистой стали перед началом охлаждения и кристаллизации.

Температурное поле и размеры ядра можно регулировать за счет изменения величины энергетических параметров:

- тока и длительности его протекания;
- сварочного усилия.

Увеличение тока приводит к росту ядра. Однако при данных длительности импульса и усилия диаметр ядра имеет предельное (критическое) значение, так как дальнейшее повышение  $I_{\text{св}}$  приводит к выбросу жидкого металла (выплеску).

С ростом усилия ядро уменьшается за счет развития пластической деформации, увеличения площади контактов и снижения плотности тока.

### 2.3.6. Тепловой баланс при сварке

Основная доля тепловой энергии при точечной, рельефной и шовной сварке генерируется за счет действия объемно распределенного источника. Роль второстепенных источников в общем тепловом балансе считается незначительной. Их доля не превышает порядка 10 % от всей генерируемой энергии на участке между электродами, поэтому их обычно не учитывают.

Выделяемая на участке электрод—электрод энергия  $Q_{\text{эз}}$  расходуется на нагрев и плавление металла ядра  $Q_{\text{п}} \approx (20-30\%) Q_{\text{эз}}$ , оставшаяся часть теплопроводностью передается в окружающий сварную точку металл, а также электроды  $Q_{\text{э}} \approx (50\%) Q_{\text{эз}}$ , что предотвращает сквозное проплавление металла. Конвективным обменом и радиацией в связи с малым временем протекания процесса можно пренебречь.

Уравнение теплового баланса при контактной сварке:

$$Q_{\text{эз}} = Q_{\text{орд}} + 2Q_{\text{пэд}} + Q_{\text{плд}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{э}}, \quad (2.5)$$

где  $Q_{\text{орд}}$  — объемно распределенный источник;  $Q_{\text{пэд}}$  — плоский источник в контакте электрод—деталь;  $Q_{\text{плд}}$  — плоский источник в контакте деталь—деталь;  $Q_{\text{п}}$  — теплота, расходуемая на нагрев и плавление металла точки;  $Q_{\text{д}}$  — теплота, расходуемая на нагрев металла деталей вокруг сварной точки;  $Q_{\text{э}}$  — теплота, расходуемая на нагрев электродов. Источник тепла, возникающий в результате действия эффекта Пельтье, и расход энергии на конвективный теплообмен в формуле не учтены.

### 2.3.7. Особенности режима в зависимости от продолжительности импульса сварочного тока

В зависимости от времени нагрева (длительности импульса тока) условно различают жесткие и мягкие режимы сварки.

Жесткие режимы характеризуются мощными импульсами тока малой продолжительности (обычно менее 0,1 с для толщин 0,8–1 мм). Время сварки в этом случае обычно принимают  $t_{\text{св}} < 0,02$  с для толщин 1–4 мм. Нагрев при этом сопровождается весьма высокими градиентами температур и определяется в основном распределением плотности тока. Зона максимальных температур (например,  $T_{\text{пл}}$ ) в этом случае смещена к границам контактов (рис. 2.13). До 80 % тепловой энергии, выделяющейся на участке электрод—электрод, расходуется на нагрев и плавление металла.

Мягкие режимы характеризуются значительной длительностью протекания тока при существенной роли теплообмена в самих деталях и между деталями и электродами; время сварки, как правило, составляет  $t_{\text{св}} > 0,1$  с для толщины деталей порядка 4 мм.

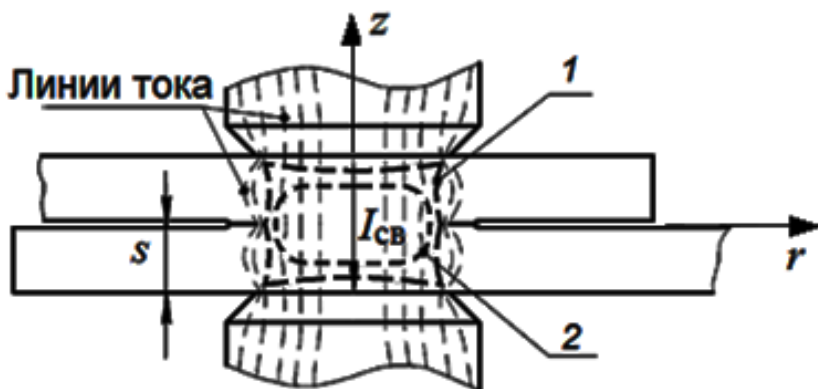


Рис. 2.13. Форма ядра при сварке на жестких (1) и мягких (2) режимах

Изотермы высоких температур представляются в виде эллипсов.

Длительный нагрев металла при мягких режимах существенно меняет первоначальное электрическое поле.

Области, отличающиеся повышенной плотностью тока, нагреваются, их сопротивление повышается, что приводит к перераспределению тока, выравниванию неравномерности электрического и теплового полей и смещению зоны максимальных температур от периферии к центру контакта. Неравномерность нагрева уменьшается также в результате пластической деформации металла и связанного с ней эффекта саморегулирования температурного поля. Например, повышение плотности тока и температуры на границе контакта приводит к уменьшению сопротивления пластической деформации. Вытекающий в зазор металл увеличивает площадь контакта, и интенсивность нагрева в этой зоне снижается. Суммарная тепловая энергия, расходуемая на нагрев деталей вокруг сварной точки и нагрев электродов, составляет порядка 80 % от энергии, выделяемой на участке электрод—электрод.

При шовной сварке источник теплоты перемещается, и теплота вводится в металл, как правило, отдельными импульсами. В этом случае на формирование электрического и температурного полей оказывает влияние эффект шунтирования тока, подогрев металла теплотой от последующей точки за счет теплопередачи. Общий характер температурного поля отличается тем, что нагрев металла околошовной зоны происходит в основном позади ролика. Изотермы соответствующих температур, как и при дуговой сварке, вытянуты в направлении, обратном движению ролика. На размеры зоны расплавления кроме перечисленных выше факторов ( $I_{св}$ ,  $t_{св}$ ,  $F_{св}$ ) оказывают также влияние время паузы между импульсами, скорость сварки и расстояние между отдельными точками.

### 2.3.8. Шунтирование тока

Шунтирование тока проявляется в протекании части тока вне участка сварки при наличии рядом электрических контактов и цепей. Например, при двусторонней сварке существование ранее сваренных точек может привести к тому, что часть тока будет проходить (шунтироваться) через эти точки. Подобным образом при односторонней сварке часть тока может проходить через верхнюю из деталей, не попадая в контакт между ними.

Ток шунтирования при двусторонней сварке можно определить по зависимости

$$I_{ш} = I_{св} \frac{r_{эз}}{r_{ш}},$$

где  $r_{эз}$  и  $r_{ш}$  — сопротивление зоны сварки и шунтирующего участка,

$$I_{св} = I_2 - I_{ш};$$

$I_2$  — ток во вторичном контуре;

$$r_{ш} = K_{э} 2\rho t_{ш} / (sb_{пр}),$$

где  $K_{э} \approx 0,4$   $b_{пр}$  — приведенная ширина шунтирующего участка;

$t_{ш}$  — шаг точек;

$$b_{пр} = (d_k + d_{п}) / 2.$$

Шунтирование проявляется в снижении плотности тока главным образом в зоне, обращенной к шунтирующему контакту (рис. 2.14). Это приводит к уменьшению тепловыделения в зоне сварки и размеров ядра. Однако отношение  $r_{эз} / r_{ш}$  велико, а  $I_{ш}$  соответственно значителен лишь при «холодных» деталях (когда  $r_{дл}$  велико). Протекание тока через детали вызывает нагрев шунтирующей ветви и рост  $r_{ш}$ , с одной стороны, и снижение  $r_{св}$  — с другой, что приводит к уменьшению  $r_{эз} / r_{ш}$  и  $I_{ш}$ . При этом основная часть тока уже проходит через зону сварки.

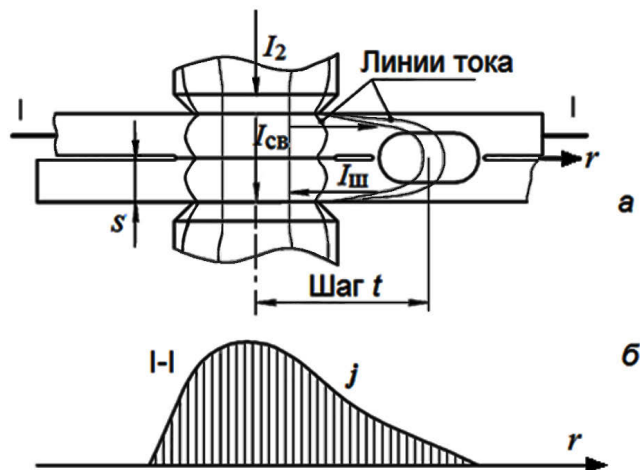


Рис. 2.14. Схема шунтирования тока при двусторонней точечной сварке (а) и распределение плотности тока в сечении I—I (б)

Значение шунтирования возрастает при уменьшении расстояния (шага) между точками. При малом шаге, меньшем диаметра ядра предыдущей точки, сечение ядра в плане отличается по форме от окружности. В частности, ширина ядра заметно больше его длины  $l$ . Кроме того, ядро вытянуто в сторону сварки (от предыдущей точки).

Уменьшение шага точек и увеличение толщины приводит к снижению сварочного тока, а следовательно, и размеров ядра. Повышается температура в контакте электрод—деталь, что вызывает повышенный износ электродов.

Для каждой из толщин и марок свариваемых металлов и сплавов выбирают оптимальный (минимально допустимый) шаг  $t_{ш.мин}$ . При этом принима-

ют, что если  $t_{ш} > t_{ш \min}$ , то  $I_{ш} \leq 0,05 I_{св}$  и шунтирование практически не влияет на электрическое поле и размеры ядра.

При шовной сварке герметичных соединений ( $t_{ш} \approx 2-3s$  и  $t_{ш} < d_n$ ) из-за повышенной температуры предыдущей точки токи шунтирования весьма ограничены, особенно при большой скорости и непрерывном вращении роликов.

### 2.3.9. Расчет сварочного тока

Сварочный ток рассчитывают по закону Джоуля — Ленца

$$I_{св} = \sqrt{Q_{э} / (m_r \times 2r_{дк} \times t_{св})}, \quad (2.6)$$

где  $Q_{э}$  — общее количество теплоты, затрачиваемой на образование соединения;  $m_r$  — коэффициент, учитывающий изменение  $r_{э}$  в процессе сварки.

Ориентировочные значения коэффициента  $m_r$  в зависимости от свойств свариваемых сталей и сплавов:

- для низкоуглеродистых сталей — 1;
- алюминиевых и магниевых сплавов — 1,15;
- коррозионно-стойких сталей — 1,2;
- сплавов титана — 1,4.

В свою очередь  $Q_{э}$  определяется по уравнению теплового баланса (2.5). В этом уравнении составляющие  $Q_{э}$  упрощенно принимаются следующими:

$Q_{п}$  — энергия, затрачиваемая на нагрев до  $T_{пл}$  столбика металла высотой  $2s$  и диаметром основания  $d_э$ ;

$Q_{д}$  — теплота, расходуемая на нагрев металла деталей в виде кольца шириной  $x_2$ , окружающего ядро (среднюю температуру кольца принимают равной  $0,25 T_{пл}$ , достигаемой на его внутренней поверхности в контакте деталей);

$Q_{э}$  — потери теплоты в электроды, которые учитываются нагревом условного цилиндра в электродах высотой  $x_3$  до средней температуры  $T_э$ . Считая, что температуры на контактной поверхности  $T_{эд} \approx 0,5 T_{пл}$ , а  $T_э \approx 0,25 T_{эд}$ , можно принять, что  $T_э \approx T_{пл}/8$  (рис. 2.15).

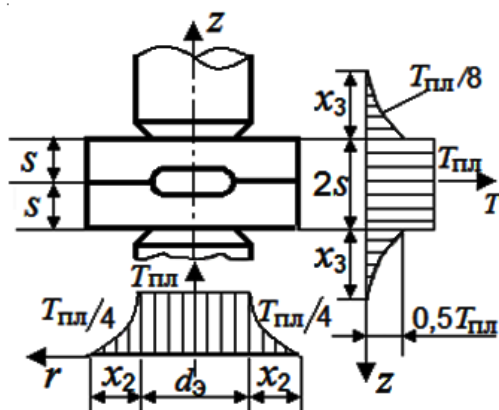


Рис. 2.15. Расчетная схема для определения силы сварочного тока



Энергия  $Q_{\pi}$  расходуется на нагрев до  $T_{\text{пл}}$  объема металла большего, чем объем ядра, что дает возможность учесть скрытую теплоту плавления металла:

$$Q_{\pi} = (\pi d_3^2 / 4) 2sc\gamma T_{\text{пл}}.$$

При расчете  $Q_d$  принимаем, что заметное повышение температуры наблюдается на расстоянии  $x_2$  от границы ядра. Значение  $x_2$  определяется временем сварки и температуропроводностью  $a_m$  металла:  $x_2 = 4\sqrt{a_m t_{\text{св}}}$ . Для низкоуглеродистых сталей  $x_2 = 1,2\sqrt{t_{\text{св}}}$ , для алюминиевых сплавов  $x_2 = 3,1\sqrt{t_{\text{св}}}$ , для меди  $x_2 = 3,3\sqrt{t_{\text{св}}}$ .

Если площадь кольца  $\pi x_2 (d_3 + x_2)$ , высота  $2s$  и средняя температура нагрева  $T_{\text{пл}}/4$ , то ориентировочно  $Q_d = k_1 \pi x_2 (d_3 + x_2) 2cs\gamma T_{\text{пл}}/4$ .

Здесь  $k_1$  — коэффициент, близкий к 0,8, учитывает, что средняя температура кольца несколько ниже средней температуры  $T_{\text{пл}}/4$ . Эта поправка введена в связи со сложным распределением температуры по ширине этого кольца, так как наиболее интенсивно нагретые участки расположены у внутренней поверхности кольца.

Потери теплоты в электроды  $Q_3$  можно оценить, принимая, что за счет теплопроводности нагревается участок электрода длиной  $x_3 = 4\sqrt{a_3 t_{\text{св}}}$  и объемом  $k_2 \pi d_3^2 x_3 / 4$  до  $T_{\text{пл}}/8$ . Коэффициент  $k_2$  учитывает форму электрода:

- для цилиндрического электрода  $k_2 = 1$ ;
- электрода с конической и плоской рабочей поверхностью  $k_2 = 1,5$ ;
- электрода со сферической рабочей поверхностью  $k_2 = 2$ .

Тогда

$$Q_3 = 2k_2 (\pi d_3^2 / 4) x_3 c_3 \gamma_3 T_{\text{пл}} / 8,$$

где  $c_3$  и  $\gamma_3$  — теплоемкость и плотность металла электрода.

Зная составляющие теплового баланса, по формуле (2.5) определяем  $Q_{\text{эз}}$ . Далее, приняв технологически целесообразное время сварки  $t_{\text{св}}$  можно, пользуясь формулой (2.6), рассчитать действующее значение сварочного тока.

## 2.4. Пластическая деформация металла при точечной, шовной и рельефной сварке

### 2.4.1. Роль пластической деформации

Пластическая деформация металла — один из основных процессов, способствующих формированию соединений, вызывается как внешним фактором — усилием со стороны электродов, так и внутренними — напряжениями, возникающими при несвободном расширении металла зоны сварки. Пластическая деформация металла имеет место на протяжении всего процесса сварки: от формирования холодного контакта до проковки соединения.

Процесс пластической деформации неразрывно связан с процессом нагрева. Тесная взаимосвязь этих двух процессов проявляется в эффекте саморегулирования теплового состояния зоны сварки путем соответствующего изменения сопротивления пластической деформации, размеров контактов и плотности тока.

Так, при случайном увеличении тока и росте температур снижается сопротивление пластической деформации, что приводит к увеличению площади контактов, снижению плотности тока, уменьшению интенсивности нагрева и определенной стабилизации температурного поля и размеров ядра.

В зависимости от объема деформируемого металла различают микропластическую деформацию микронеровностей контактных поверхностей и объемную пластическую деформацию значительных масс металла зоны сварки.

Основная роль пластической деформации при сварке заключается:

- в формировании электрического контакта;
- в образовании уплотняющего пояска для удержания расплавленного металла от выплеска и ограничения растекания сварочного тока во внутреннем контакте;
- в уплотнении металла на стадии охлаждения.

Непосредственная роль пластической деформации в образовании металлических связей при точечной и шовной сварке невелика из-за малой относительной сдвиговой деформации в пояске. Лишь при сварке титановых сплавов за счет растворения оксидов в основном металле отмечается область развитой связи, повышающей прочность соединений. Возможно также образование связей в твердой фазе при микросварке некоторых металлов и наплавке.

При рельефной сварке за счет деформации выступов (рельефа) относительная сдвиговая деформация возрастает, что позволяет в ряде случаев получать достаточно прочные соединения без расплавления металла преимущественно при сварке углеродистой стали.

#### **2.4.2. Микропластическая деформация**

Микропластическая деформация идет на протяжении I и приблизительно первой четверти II этапа формирования соединения в основном в условиях холодного контакта. При обычных циклах сварки образование электрического контакта — снижение контактного сопротивления — в основном завершается спустя время, равное  $(0,1-0,2) t_{св}$ . При сжатии электродов происходит сначала упругая, а затем пластическая деформация микронеровностей, последняя активно развивается при включении сварочного тока. При микропластической деформации разрушаются оксидные пленки, инициируется процесс выравнивания рельефа. Основная роль микропластической деформации заключается в создании устойчивой контактной площадки до включения сварочного тока и стабилизации контактного сопротивления, что помогает предотвратить наружный начальный выплеск и уменьшить неравномерность начального электрического поля.

Процессы микропластической деформации в первую очередь зависят от механических свойств (твердости, прочности) свариваемого материала и электродов, а также усилия сжатия. Например, при сварке алюминиевых сплавов рельеф поверхности в контакте электрод—деталь деформируется на 70–80 % от первоначального значения и становится равным рельефу поверхности электрода, а при дальнейшем увеличении усилия сжатия практически не изменяется.

### 2.4.3. Объемная пластическая деформация при точечной сварке

При точечной сварке вследствие неравномерного нагрева образуется зона металла с различным сопротивлением пластической деформации. Тепловое расширение происходит в стесненных условиях и сопровождается возникновением неравномерного распределения внутренних напряжений, которые в сочетании с постоянно действующим внешним усилием сжатия  $F_{св}$  вызывают необратимые объемные пластические деформации.

Упрощенная качественная модель напряжений, сил и деформации в стадии нагрева представлена на рис. 2.16. Объемно-напряженное состояние зоны сварки характеризуется сжимающими радиальными  $\sigma_r$ , окружными  $\sigma_\theta$  и осевыми  $\sigma_z$  напряжениями (последние суммируются с  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$ ), а также деформациями  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_z$ .

Наибольшие значения  $\sigma_z$  отмечаются вблизи оси  $z$ , где напряженное состояние близко к всестороннему сжатию. Наименьшее значение  $\sigma_z$  и соответственно минимальное сопротивление металла пластическим деформациям  $\sigma_z$  — на периферии контактов и особенно на границе контакта деталь—деталь.

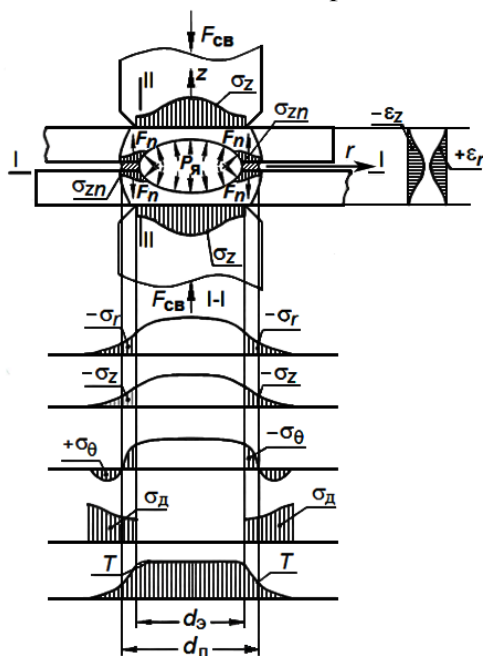


Рис. 2.16. Характер пластической деформации при точечной сварке

Это объясняется наличием зазора между деталями, поэтому деформируемый металл здесь встречает наименьшее сопротивление и «течет» в направлении оси  $r$ . Наибольшая степень пластической деформации ( $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_\theta$ ,  $\epsilon_z$ ) отмечается в области пояска ( $z = 0$ ). На рис. 2.16 приведено распределение  $\epsilon_z$  и  $\epsilon_r$  (сечение II–II), из которого видно, что по оси  $z$  происходит деформация укорочения, а по оси  $r$  — деформация удлинения.

Например, при точечной сварке двух деталей из алюминиевых сплавов толщиной  $2 + 2$  мм  $\epsilon_{z\max} = 20\%$ , а  $\epsilon_{r\max} = 15\%$ . Вблизи поверхностей деталей  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_\theta$  и  $\epsilon_z$  практически равны нулю.

Тепловое расширение металла в области контакта деталь–деталь — основная причина образования зазора, в который происходит пластическое вытеснение части нагретого металла.

До расплавления снижение сопротивления металла пластическим деформациям  $\sigma_d$  и избыток металла за счет дилатометрического эффекта (теплового расширения металла) компенсируются небольшим раздвиганием электродов, а также вытеснением части металла в зазор, что обеспечивает во внутреннем контакте рельеф, ограничивающий растекание сварочного тока.

При расплавлении в замкнутом объеме резко увеличивается объем металла ядра, возбуждаются электромагнитные силы (последние составляют  $\sim 5\% F_{\text{св}}$ ); в результате возникает гидростатическое давление  $p_d$ , определяемое общим балансом напряжений в зоне сварки. Продолжающееся тепловое расширение и общее снижение  $\sigma_d$  по-прежнему компенсируются раздвиганием электродов и дальнейшим вытеснением в зазор деформируемого металла. Это способствует образованию не только пояска, ограничивающего растекание сварочного тока, но и герметизации литого ядра, предохраняя металл от выплеска и контакта с атмосферой. Сварочное усилие  $F_{\text{св}}$  на стадии плавления должно быть наибольшим, так как оно обеспечивает устойчивость процесса против образования выплеска. Сварочное усилие  $F_{\text{св}}$  должно возрасти при увеличении  $\sigma_d$  металла — при жестких режимах сварки или при сварке высокопрочных, твердых металлов, например жаропрочных сплавов. Оно может быть уменьшено путем предварительного подогрева деталей.

Внутренняя граница металла пояска имеет температуру, близкую к температуре плавления, и следовательно, низкое значение  $\sigma_d$ , температура внешней границы намного ниже и соответственно  $\sigma_d$  больше. Металл пояска находится в объемно-напряженном состоянии, при этом сжимающие напряжения  $\sigma_{\text{сп}}$  и сила  $F_{\text{п}}$  стремятся увеличить зазор между деталями.

Рассмотренный характер объемной деформации приконтактной области I–I (рис. 2.16) деталей вызывает «оседание» верхних слоев металла и образование вмятины от электрода на поверхности. Скорость этого оседания и размеры вмятины резко возрастают при образовании внутреннего выплеска.

При нагреве до плавления целой пластины (рис. 2.17, *а*) или при сварке двух деталей с автономным обжатием периферии соединения (с помощью втулки с отдельным приводом, «надетой» на электрод) сопротивление деформации в радиальном направлении весьма велико. Поэтому пластическая деформация проявляется в образовании рельефа на поверхности деталей — в области с наименьшим сопротивлением деформации, сопровождающегося более интенсивным раздвиганием электродов и уменьшением размеров вмятины на поверхностях деталей.

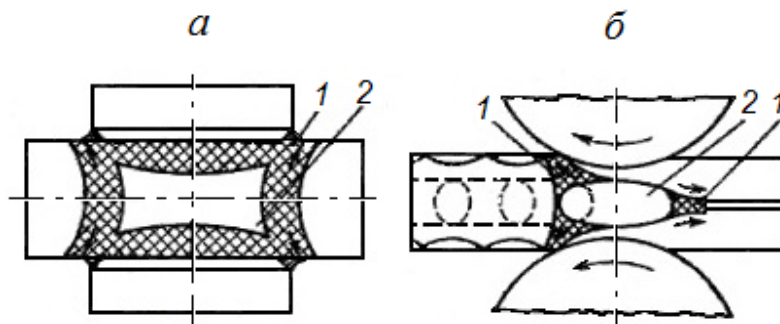


Рис. 2.17. Направление пластической деформации:  
*а* — нагрев целой пластины; *б* — шовная сварка герметичных швов:  
 1 — зона пластической деформации; 2 — расплавленный металл

Обычная схема сварки предполагает наличие некоторого динамического равновесия между величиной  $F_{св}$  и средним сопротивлением пластической деформации зоны сварки, а также количеством вытесненного металла в зазор между деталями. Нарушение равновесия приводит или к быстрому росту уплотняющего пояска, снижению плотности тока и замедлению роста литого ядра — устойчивый процесс сварки, или, наоборот, к быстрому росту литого ядра, увеличению давления  $P_d$ , замедлению роста пояска, разгерметизации расплавленной зоны и выплеску.

Приближенно объективным критерием оценки устойчивости процесса к выплеску может служить общая степень пластической деформации  $\mu_0$ , которая определяется отношением смещенного объема  $V_{см}$  к деформируемому объему металла  $V_d$ :

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{см}}{V_d} 100\%.$$

Деформируемый объем представляется условно в виде цилиндра с основанием  $d_n$ , и тогда  $V_d = 2\pi d_n^2 / 4$ . В свою очередь  $V_{см} = V_3 + V_T$ ,

где  $V_3$  — объем вытесненного металла при вдавливании электрода;  $V_T$  — изменение объема цилиндра вследствие нагрева.

Так, например, для алюминиевых сплавов  $\varepsilon_0 = 12\text{--}5\%$ ,  $V_3 \approx V_T$ . Отмечается определенное постоянство  $\varepsilon_0$ , что объясняется необходимостью перемещения заданных объемов металла в зазор для образования уплотняющего пояса и компенсации теплового расширения.

#### **2.4.4. Особенности объемной пластической деформации при шовной и рельефной сварке**

Характер процессов пластической деформации при сварке первой точки шва аналогичен процессам при точечной сварке. Но в процессе выполнения последующих точек характер деформации существенно изменяется. Перед роликом, в направлении сварки, зазор между деталями сохраняется, поэтому металл, не встречая сопротивления, деформируется в него, как и при точечной сварке. Позади ролика деформации препятствует металл уже сформированных точек, по этой причине металл вытесняется под ролик (рис. 2.17, б), так же как и в случае нагрева целой пластины (рис. 2.17, а). В результате на поверхности шва образуется серповидный рельеф. Достаточно высокое теплосодержание зоны соединения обеспечивает более высокую степень общей пластической деформации, что приводит к увеличению размеров уплотняющего пояса. Снижение сопротивления пластической деформации в результате повышенного теплосодержания зоны сварки позволяет в ряде случаев несколько понизить усилия по сравнению с режимами точечной сварки и иногда даже уменьшить время сварки.

Пластическая деформация при определенных условиях (соответствующего соотношения параметров режима) оказывает благоприятное влияние на плотность шва. При сварке последующей точки осуществляется повторный нагрев предыдущего участка, что способствует заполнению несплошностей (раковин) деформируемым в них металлом и повышению плотности шва и околошовной зоны.

Повышенная деформация поверхностных слоев металла является причиной более интенсивного износа рабочей поверхности роликов и нарушения его геометрии.

При рельефной сварке отмечается значительная деформация (осадка) рельефа на первом и особенно на втором этапе формирования соединений. При рельефной сварке до начала расплавления металла необходимо обеспечить наибольшую степень пластической деформации в радиальном направлении в плоскости контакта деталь—деталь, что приводит к лучшей очистке поверхности и образованию металлических связей за счет сдвиговых деформаций (рис. 2.18, а). Одновременно в результате деформации по направлению оси  $z$  происходит заполнение технологической впадины под электродом. Обычно соединение в твердом состоянии образуется по кольцу по периферии контакта. Дальнейший нагрев металла в большинстве случаев приводит к обра-

зованию ядра по обычной схеме точечной сварки (рис. 2.18, б). Рельеф при сварке полностью деформируется, но на поверхности детали под электродами обычно остаются небольшие вмятины.

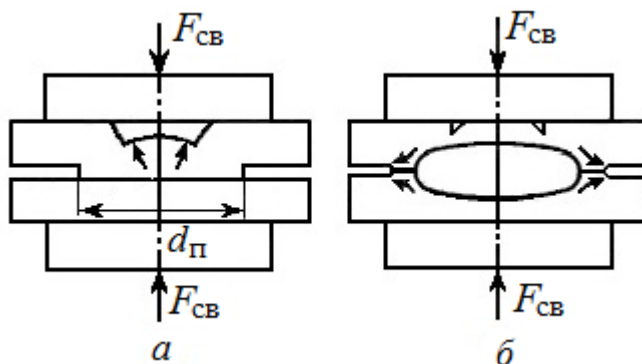


Рис. 2.18. Пластическая деформация металла при рельефной сварке:  
а — в начале процесса; б — в конце процесса

## 2.5. Удаление поверхностных пленок при точечной, шовной и рельефной сварке

Поверхностные пленки (оксиды, слои плакировки и др.) в большинстве случаев (за исключением оксидов железа и некоторых других металлов) более тугоплавки, чем свариваемые металлы или сплавы. На первых двух этапах формирования соединения они должны быть разрушены и удалены из плоскости соединения двух деталей, так как их присутствие в конечной стадии в жидком ядре препятствует образованию металлических связей и приводит к образованию дефектов.

При точечной, рельефной и шовной сварке полное разрушение и перераспределение поверхностных пленок и загрязнений возможно только при взаимном расплавлении металла в контакте двух листов. Процессы разрушения и удаления включений происходят под действием сил, имеющих электродинамическую природу. Действие этих сил вызывает интенсивное перемешивание жидкого металла ядра. Перемешивание жидкого металла при определенном времени процесса обеспечивает выравнивание состава литого ядра.

Взаимодействие сварочного тока с магнитным полем, созданным этим же током, вызывает объемные силы, под действием которых и происходит перемешивание. Характер и направление действия этих сил можно объяснить с помощью упрощенной модели процесса (рис. 2.19).

В зависимости от распределения плотности тока  $j_0$  по сечению ядра сила  $\Delta F_j$ , действующая на элементарный объем металла  $\Delta V$ , находящийся на расстоянии  $r$  от оси  $z$ ,

$$F_j = \mu_a j_0 \Delta V H = \mu_a j_0^2 \frac{\Delta V r}{2},$$

где  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость вещества;

$H = j_0 r / 2$  — напряженность магнитного поля;

Направление к центру ядра этой силы определяют по правилу левой руки. Силы  $\Delta F_j$ , действующие на все объемы  $\Delta V$  ядра, создают в жидком ядре давление, подобное давлению, возникающему в жидкости от гравитационных сил. Силы  $\Delta F_j$  действуют и на объемы металла, находящегося в твердом состоянии, но там они уравновешены силами сопротивления кристаллической решетки.

Объемные силы  $\Delta F_j$  имеют максимальное значение на периферии ядра и снижаются до нуля в центре ядра. Давление (в сечении контакта листов) достигает максимума в центре ядра и с учетом величины радиуса ядра  $R = d_w / 2$  описывается уравнением параболы (рис. 2.19, а)

$$p = \mu_a j_0^2 (R^2 - r^2) / 4.$$

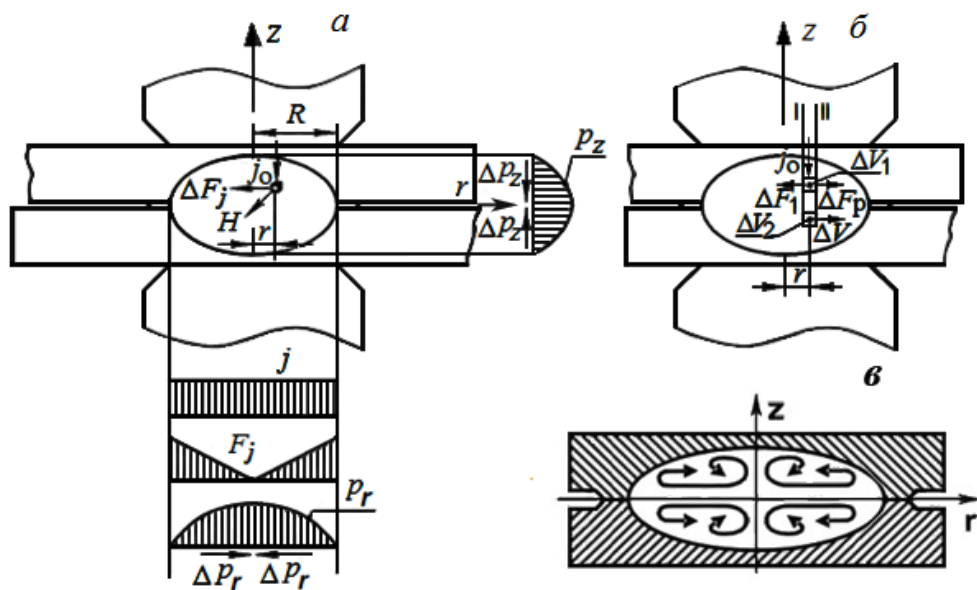


Рис. 2.19. Схема определения электродинамических сил в жидком ядре и эпюры распределения плотности тока (а); характер сил, действующих на нерастворимые частицы в жидком металле ядра (б); направление перемешивания металла в ядре (в)

В большинстве случаев ядро имеет форму эллипсоида, поэтому в расплавленном металле возникают градиенты давления в горизонтальном  $\Delta p_r$  и в вертикальном  $\Delta p_z$  направлениях, неравные по своей абсолютной величине.



не. Под действием этих градиентов слои жидкости циркулируют к периферии ядра в направлении оси  $r$  и оси  $z$ , а затем по границе ядра возвращаются к центру. Незначительная асимметрия в расплавлении двух листов приводит к перемешиванию поверхностных пленок в расплаве.

В ядре могут находиться взвешенные в расплаве твердые частицы — электропроводные металлические с малым электросопротивлением  $\Delta V_1$  или, чаще, неэлектропроводные частицы пленок  $\Delta V_2$  (рис. 2.19, б). На них действуют силы  $\Delta F_p$ , вызванные разностью давлений  $\Delta p_r$  в сечениях I—I и II—II:

$$\Delta F_p = \Delta p_r \Delta V.$$

Неэлектропроводные частицы перемещаются и скапливаются на периферии литого ядра. Если плотность тока  $j_1$  в электропроводной частице  $\Delta V_1$  больше плотности тока  $j_0$  в расплаве, то на частицу будет действовать разность сил

$$\Delta F_{p1} = \Delta F_p - \Delta F_j = \mu_a (j_0^2 - j_1^2) r^2 / 4 ,$$

под действием которой частица будет двигаться к центру ядра.

Таким образом, объемные электродинамические силы приводят к интенсивному перемешиванию расплава и к сепарации частиц пленок в ядре в зависимости от их электропроводности.

## 2.6. Сопутствующие процессы при образовании соединений

Сопутствующие процессы в значительной мере взаимосвязаны с рассмотренными выше основными процессами и являются следствием их протекания.

### 2.6.1. Тепловое расширение металла при сварке

Нагрев металлических тел сопровождается увеличением их линейных размеров и объема (дилатометрический эффект). Известно, что при температуре  $T$  твердого тела его длина  $l_t$  и объем  $V_t$  соответственно равны:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha_t T) \text{ и } V_t = V_0 (1 + \beta_v T) ,$$

где  $l_0$  и  $V_0$  — длина и объем тела при  $T=0$ ;  $\alpha_t$  и  $\beta_v$  — термические коэффициенты линейного и объемного расширения.

При плавлении объем тела резко увеличивается на 8–10 %. Увеличение объема металла при переходе в жидкое состояние носит скачкообразный характер.

В условиях точечной и шовной сварки увеличение толщины и объема деталей происходит преимущественно в направлении оси  $z$ , так как возрастание размеров по оси  $r$  сдерживается жесткостью соседних с зоной сварки более холодных участков металла за исключением зоны контакта деталей.

При точечной и шовной сварке дилатометрический эффект увеличения размеров деталей по оси  $z$  может проявиться небольшим раздвижением электродов. В том случае, когда возможность перемещения электродов исклю-

чена, происходит значительное увеличение усилия сжатия за счет внутренних сил.

Таким образом, увеличение объема при нагреве металла сопровождается возникновением в приводе сжатия машины внутренних сил  $F_T$ . Эти силы стремятся раздвинуть электроды на величину  $\Delta_T$ . Обычно подвижен верхний электрод, и для его перемещения необходимо преодолеть лишь силу трения в приводе сжатия и силу инерции подвижных частей этого привода, так как усилие сжатия в этих условиях в значительной степени уравнивается реакцией нижнего электрода  $F_p$ . Как правило, указанные силы невелики, и верхний электрод перемещается при сварке на величину  $\Delta_{\text{н}}$ . Величина  $\Delta_{\text{н}}$  зависит не только от температуры, но и от степени пластической деформации  $\Delta_d$  металла в зазор между деталями (глубины вмятины под электродами).

Заметное перемещение электрода обычно наблюдается с момента расплавления ядра, когда изменение объема наибольшее. Максимальное значение  $\Delta_{\text{н}}$  связано с размерами ядра. Указанный эффект используют для контроля и автоматического регулирования размеров ядра.

### 2.6.2. Процессы массопереноса в контакте электрод–деталь

При сварке имеет место взаимный перенос небольших масс металла электродов и деталей через границу их контакта механическим путем или вследствие диффузии.

С момента приложения сварочного усилия до включения сварочного тока (рис. 2.20, а) в контакте электрод–деталь идут процессы упругопластической деформации микровыступов, внедрение выступов во впадины, их срез и «застревание», частичное разрушение находящихся на их поверхности оксидов и образование относительно небольшого количества локальных, преимущественно физических связей. Этим процессам способствуют также сдвиговые деформации, вызванные перемещением электродов относительно поверхности деталей из-за различной жесткости нижней и верхней консолей внешнего контура сварочной машины. На рисунке показано, как выступы со слоем оксидов, показанных белым цветом, разрушают слой оксидов, показанных темным цветом, хотя возможен и противоположный эффект.



Рис. 2.20. Процессы массопереноса в области контакта электрод–деталь

До включения сварочного тока указанные процессы находятся в зачаточном состоянии, и массоперенос практически не наблюдается. При включении сварочного тока (рис. 2.20, б) по мере нагрева приэлектродной области

деталей сопротивление пластической деформации микрорельефов снижается, соответственно возрастает их пластическая деформация, расширяются участки фактического контактирования, создаются условия образования очагов не только физических, но и химических связей. Получают развитие процессы взаимной диффузии металлов (изображено на рис. 2.20, б светлыми и темными точками).

В частных случаях сварки, например оцинкованной стали, магниевых сплавов и других металлов, возможно локальное поверхностное плавление в связи с образованием легкоплавких эвтектик (магния или цинка в составе деталей с медью электродной бронзы) (рис. 2.20, в). При плавлении резко возрастает скорость взаимной диффузии.

При недостаточно тщательной зачистке поверхностей деталей или электродов изолированные полости, образованные между микрорельефами, оказываются заполненными оксидными и гидроксидными пленками и адсорбированными веществами (рис. 2.20, г).

С ростом температуры гидроксиды разлагаются с выделением газа, в частности кислорода. Возникающее при этом избыточное давление создает так называемый «распорный» эффект  $F_{\text{рас}}$ , который снижает давление в контактах, а избыток кислорода вторично окисляет основания выступов, препятствуя расширению площади электрических контактов. Эти явления увеличивают контактное сопротивление, что вызывает повышение температуры в контакте электрод—деталь.

Выключение сварочного тока, снятие усилия и дальнейший подъем электрода (рис. 2.20, д) приводят к разрушению образовавшихся локальных связей в результате действия упругих сил, накопленных при деформации микровыступов, частично распорного эффекта, а также механических перемещений.

На поверхности электродов остаются частицы свариваемого металла, перенесенного в результате диффузии или механических деформационных процессов. Активность последних в значительной мере зависит от соотношения твердости металла электродов и деталей. Так, частицы мягкого металла (например, алюминия) легко «захватываются» относительно твердым рельефом поверхности электрода. Этот процесс почти не отмечается при сварке стальных деталей.

Таким образом, скорость массопереноса определяется:

- температурой в контакте;
- временем пребывания металлов при повышенных температурах;
- состоянием поверхностей деталей и электродов;
- степенью деформаций сдвига;
- физическими свойствами электродного и свариваемого металлов.

В процессе эксплуатации электродов скопление на их поверхности продуктов взаимодействия от массопереноса увеличивается. Эти участки на опреде-

ленном этапе сварки начинают препятствовать «нормальной» реализации сварочного процесса. На поверхности деталей остаются включения электродного металла, их количество увеличивается по мере увеличения продуктов взаимодействия на электродах, что ухудшает качество поверхности деталей и вызывает повышенную коррозию.

### **2.6.3. Влияние термдеформационных процессов на свойства металла зоны сварки**

Металл в процессе сварки подвергается термдеформационному воздействию, оказывающему влияние на структуру и свойства металла ядра и околошовной зоны.

Начало кристаллизации жидкого металла зависит от формы импульса тока. При сварке импульсом переменного тока или униполярным импульсом с резким спадом кристаллизация обычно начинается с момента выключения тока. Лишь при сварке на некоторых конденсаторных машинах с относительно плавным спадом тока плавление металла может продолжаться и на спадающей части импульса. Высокая интенсивность отвода теплоты при охлаждении увеличивает вероятность переохлаждения, и кристаллизация происходит с очень большой скоростью.

В большинстве случаев (стали, никелевые, титановые сплавы) структура литого ядра представляется в виде дендритов, растущих на базе полуплавленных зерен основного металла. Оси этих дендритов в центральной зоне ядра совпадают с осью электродов, т. е. с направлением максимального градиента температур и наибольшего отвода теплоты (рис. 2.21).

Жидкий металл ядра хорошо смачивает поверхность полуплавленных зерен, что создает благоприятные условия для гетерогенного зарождения кристаллов. Для ряда легких сплавов, отличающихся широким интервалом кристаллизации, например АМг6, Д16 (интервал кристаллизации соответственно 70 и 130 °С), кроме участка дендритной структуры, отмечается наличие протяженной зоны равноосных кристаллов. Появление этой зоны объясняется большой склонностью указанных сплавов к концентрационному переохлаждению.

При больших скоростях охлаждения, характерных для контактной сварки, увеличивается вероятность переохлаждения жидкого металла. Например, на магниевых сплавах (МА2-1) направленная кристаллизация на базе полуплавленных зерен основного металла полностью подавлена, и в ядре образуются равноосные зерна. При сварке сталей и титановых сплавов структура ядра представляется в виде крупных дендритов первого порядка, оси которых совпадают с осью  $z$  — направлением наибольшего теплоотвода.

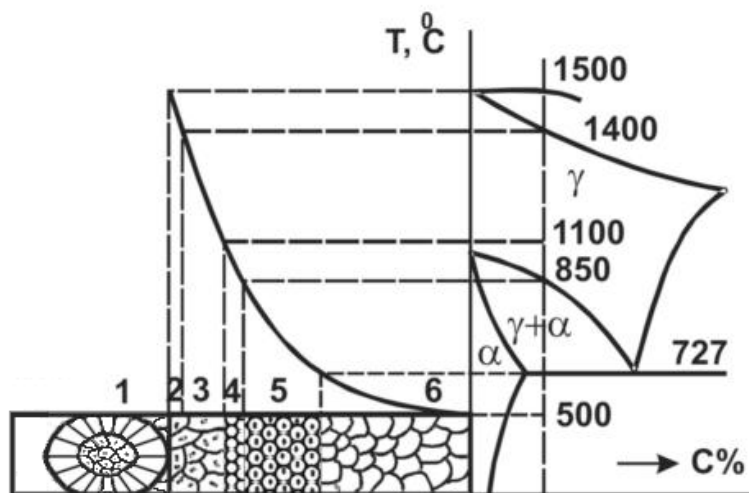


Рис. 2.21. Структура ядра и околошовной зоны при сварке низкоуглеродистых сталей:

- 1 — ядро с участками дендритной структуры и зоной равноосных кристаллов;  
 2 — зона частичного оплавления границ зерен; 3 — зона перегрева;  
 4 — зона закалки; 5 — зона частичной закалки;  
 6 — зона отпуска и рекристаллизации

Для алюминиевых сплавов характерно наличие двух зон: дендритная структура на периферии ядра и в центре его протяженная область равноосных зерен. При больших скоростях охлаждения усиливаются процессы ликвации. Содержание легирующих элементов увеличивается от основания к вершине дендритов (внутридендритная ликвация). Отдельные кристаллы окружены сеткой интерметаллидов и эвтектик (междендритная ликвация). При точечной и шовной сварке проявляется и зональная ликвация, например зона равноосных кристаллов при сварке Д16Т оказывается обогащенной медью.

Литой металл ядра отличается низкой пластичностью, особенно при соединении металлов, чувствительных к термическому циклу, например высокопрочных конструкционных сталей. Зоны, в которых отмечается развитие ликвационных процессов, также характеризуются повышенной хрупкостью. Неравномерность состава шва с трудом выравнивается даже при последующей термообработке.

В околошовной зоне наблюдаются изменения исходной структуры и свойств металла вследствие закалки, оплавления легкоплавких эвтектик по границам зерен, отпуска, частичного отжига, снятия нагартовки, рекри-

сталлизации и т. п. Таким образом, в результате неравномерного нагрева в околосшовной зоне отмечается широкая гамма структур при относительно малой ширине зоны термического влияния.

#### 2.6.4. Образование остаточных напряжений

В стадии охлаждения в зоне сварки (этап III на рис. 2.1) возникает сложнапряженное состояние металла из-за несвободной усадки и действия усилия сжатия.

Характер распределения внутренних напряжений изменяется во времени, так как зависит не только от усадки и внешнего давления, но и от сопротивления пластической деформации металла. В начале охлаждения или при относительно малом значении сопротивления пластической деформации  $\sigma_d$  усадка вдоль оси  $z$  в значительной мере компенсируется деформацией металла от  $F_{св}$ . При точечной сварке растягивающие напряжения в этом направлении невелики, а в приэлектродной области часто обнаруживаются остаточные сжимающие напряжения.

Усадка в продольном направлении (вдоль оси  $r$ ) практически не компенсируется, так как за счет охлаждения вокруг литого ядра образуется своеобразный жесткий каркас, препятствующий деформации от внешнего усилия в этом направлении. Поэтому в центральной части зоны сварки получают развитие процессы образования остаточных радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  напряжений.

Механизм образования этих напряжений можно пояснить следующей схемой (рис. 2.22). При охлаждении внутренние слои, например в виде кольца, стремятся укоротиться, чему соседние наружные более холодные слои препятствуют. Поэтому в металле образуются остаточные растягивающие напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ . При удалении от ядра температура и величина усадки снижаются, растягивающие напряжения уменьшаются до нуля. На значительном расстоянии  $\sigma_\theta$  меняют свой знак и превращаются в сжимающие. Следует иметь в виду, что при охлаждении остаточные растягивающие напряжения могут достигать предела текучести  $\sigma_T$ . После полного охлаждения уровень напряжений меньше  $\sigma_T$  (например, при точечной сварке деталей из сплава АМгб они составляют  $(0,4-0,5) \sigma_m$ ).

Если по мере охлаждения зоны сварки за счет увеличения внешнего давления вызвать дополнительную пластическую деформацию металла и тем самым обеспечить компенсацию усадочных процессов, можно снизить и даже преобразовать растягивающие напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  в сжимающие. Это практически реализуется путем плавного или ступенчатого повышения усилия сжатия до ковочного значения  $F_{ков}$ .

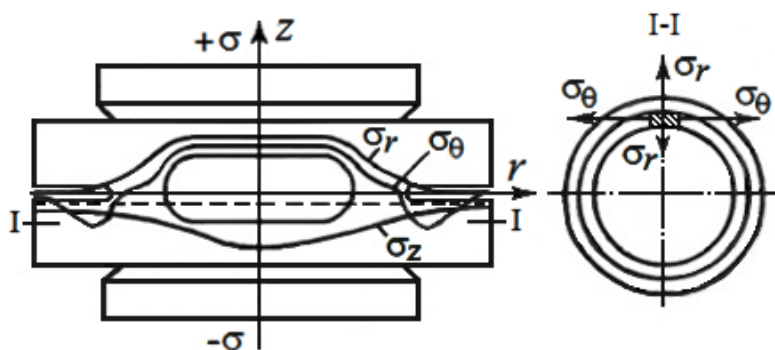


Рис. 2.22. Остаточные напряжения после сварки

Плавное изменение усилия  $F_{\text{ков}}$  является наилучшим, но сложно реализуемым в сварочных машинах вариантом, который позволяет получить постоянное давление на охлаждающийся металл и в результате — сжимающие остаточные напряжения. Уменьшить количество усадочных дефектов можно также снижением сопротивления пластической деформации  $\sigma_d$  путем замедленного охлаждения при использовании подогрева током, что дает возможность снизить  $F_{\text{ков}}$ , например, при точечной сварке алюминиевых сплавов на низкочастотных машинах и машинах постоянного тока до 20 % и более.

Поскольку образование остаточных напряжений за счет усадки продолжается до полного охлаждения, то становится значимым время проковки. При точечной сварке стали 09Г2С толщиной 6 + 6 мм увеличением этого времени с 0,5 до 7 с удается повысить предел выносливости при многоцикловой нагрузке с 60 до 120 МПа. При сварке малых толщин (до 1 мм) обеспечить необходимую для снижения остаточных растягивающих напряжений деформацию можно без приложения  $F_{\text{ков}}$ .

## 2.7. Основные дефекты при точечной, шовной и рельефной сварке

Основные дефекты, возникающие в процессе образования сварного соединения при контактной сварке:

- непровары;
- выплески;
- несплошности зоны сварки (трещины, раковины);
- снижение коррозионной стойкости соединений;
- неблагоприятные изменения структуры металла.

### 2.7.1. Непровары

Непровар — наиболее опасный и трудновывяемый дефект, при котором зона совместного расплавления (при точечной сварке она определяется

диаметром этой зоны  $d_{с.р.}$ ) меньше требуемой в чертеже изделия. Непровар может проявляться в виде полного отсутствия (рис. 2.23, *а*) или уменьшения (рис. 2.23, *в*) литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или плакирующего слоя в контакте деталь—деталь (рис. 2.23, *г*, *д*). Наиболее опасен непровар, в котором образуется соединение в твердом состоянии (рис. 2.23, *б*) по микрорельефам поверхности. Такое соединение трудно выявить, оно может выдержать иногда относительно большие статические срезающие нагрузки и хрупко разрушиться при небольших напряжениях отрыва и знакопеременных нагрузках.

При недостаточной энергии сварочного импульса размер ядра сварной точки  $d_{я}$  оказывается меньше номинального значения  $d_{ном}$ , необходимого по условию эксплуатационной прочности (рис. 2.23, *в*).

Непровары, показанные на рис. 2.23, *г*, *д*, встречаются, например, при сварке алюминиевых сплавов (АМг6, Д16 и др.), имеющих на поверхности увеличенную толщину плакирующего слоя из чистого алюминия — металла, который обладает более высокой электропроводимостью и  $T_{пл}$ , чем основной сплав. При плавлении основного металла плакирующий слой не расплавляется и препятствует образованию металлических связей в расплавленном состоянии. В этом случае, а также при относительно толстых тугоплавких оксидных пленках электромагнитные силы, необходимые для перемешивания расплавленного металла, оказываются недостаточными для их разрушения.

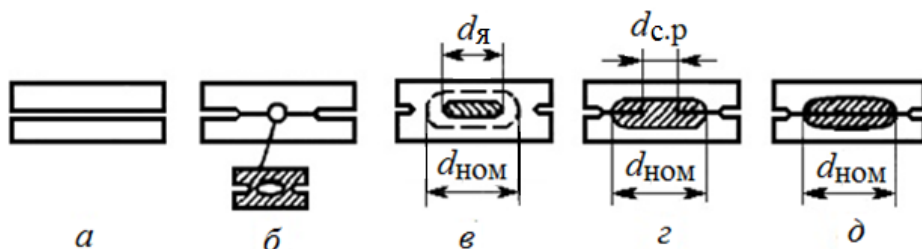


Рис. 2.23. Виды непроваров: *а* — полное отсутствие соединения; *б* — соединение по отдельным микрорельефам; *в* — малый диаметр ядра; *г* — недостаточная зона взаимного сплавления; *д* — отсутствие совместного сплавления

Общая причина непроваров — неверный выбор параметров режима сварки (снижение  $I_{св}$  и  $t_{св}$  или увеличение  $F_{св}$  и  $d_3$ ), а также других технологических факторов (малые нахлестка и расстояние между точками, большие зазоры), приводящих к снижению плотности тока (тепловыделения).

При шовной сварке отмечается постепенное снижение плотности тока и размеров литой зоны после сварки нескольких первых точек из-за накопления теплоты и снижения сопротивления пластической деформации металла. Это обстоятельство следует учитывать при выборе режима шовной сварки.



Для предупреждения непроваров следует обеспечить:

- стабильность технологических факторов и работы сварочного оборудования;
- удаление перед сваркой тугоплавких оксидов и плакирующих слоев, препятствующих процессу образования зоны взаимного полного сплавления деталей.

### 2.7.2. Выплески

Выплеск — это выброс части расплавленного металла из зоны сварки (рис. 2.24).

Выплески разделяют:

- на наружные (из области контакта электрод—деталь);
- внутренние (между деталями);
- начальные (на I этапе);
- конечные (на II этапе).

Наружные выплески ухудшают внешний вид изделий и снижают стойкость электродов. Внутренние выплески часто препятствуют дальнейшему росту ядра вследствие повышенного растекания тока и охлаждения металла (с выплеском из зоны сварки «выносятся» часть тепловой энергии). Конечные выплески часто являются причиной образования трещин, раковин и глубоких вмятин.

Общая причина появления этого дефекта состоит в отставании скорости деформации от скорости нагрева. Например, начальные выплески объясняются перегревом отдельных участков (локальных контактов) относительно малой площади из-за перекоса электродов, плохой подготовкой поверхности.

При сварке металлов с малым сопротивлением деформации выплески не характерны (алюминиевые и магниевые сплавы). Вероятность их появления возрастает при использовании жестких режимов сварки и небольших сварочных усилиях. Наиболее опасным и трудно выявляемым является внутренний конечный выплеск.

Конечный внутренний выплеск связан с раскрытием зазора вследствие теплового расширения металла, прорывом уплотнительного пояса жидким металлом, находящимся под высоким давлением, и его «выбросом» из зоны сварки (рис. 2.24, в).

Недостаточное сварочное усилие  $F_{св}$  при высоком давлении жидкого металла в ядре, а также не полностью сформированный уплотнительный пояс являются условиями, способствующими возникновению этого вида выплеска.

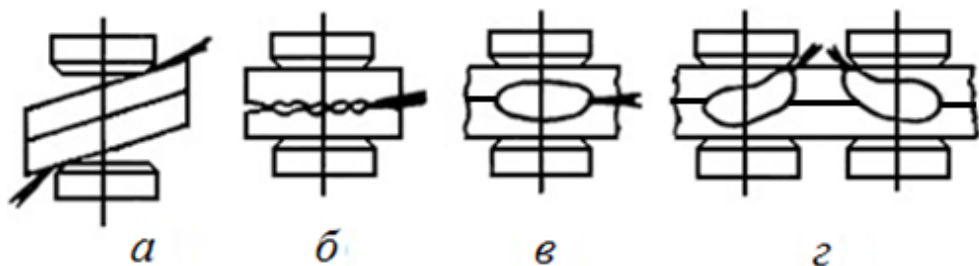


Рис. 2.24. Виды выплесков: *а* — наружный; *б* — начальный внутренний; *в* — конечный внутренний; *г* — конечный наружный

Склонность к появлению конечного внутреннего выплеска можно оценить, используя коэффициент  $k_b$ , который представляет собой отношение критического  $d_{кр}$  и минимально допустимого  $d_{min}$  диаметров ядер:

$$k_b = d_{кр} / d_{min}.$$

Величина  $d_{кр}$  — это максимальный диаметр ядра, который удастся получить без выплеска за счет увеличения  $I_{св}$  (при  $F_{св} = \text{const}$  и  $t_{св} = \text{const}$ ). Величина  $k_b$  зависит от режима сварки и формы импульса сварочного тока. Для увеличения  $k_b$  (уменьшения сопротивления деформациям  $\sigma_d$ ) лучше всего использовать мягкие режимы, предварительный подогрев отдельным или модулированным импульсом, унipoлярные импульсы низкочастотных машин и машин постоянного тока, режимы, близкие к полнофазному включению на машинах переменного тока.

Помимо этого, предупредить раскрытие зазора и конечный выплеск возможно путем повышения усилия на 15–20 % в конце цикла нагрева, а также размещения между деталями ленты или плакирующего слоя из пластичного металла. Почти полностью исключить его можно при обжатии металла вокруг электрода, что особенно важно при сварке деталей неравных толщин и из разноименных металлов.

### 2.7.3. Несплошности зоны сварки

В стадии охлаждения часты случаи образования несплошностей в литом металле сварного шва: наружные и внутренние трещины, раковины (рис. 2.25). Механизм образования несплошностей в кристаллизующейся точке объясняется неблагоприятным сочетанием деформационного и металлургического факторов.

Температурное поле в условиях точечной и шовной сварки характеризуется значительной неравномерностью. Охлаждение металла в этих условиях приводит к возникновению растягивающих напряжений. Объемный характер совместных воздействий напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{\theta r}$  показан на рис. 2.25 в приложении к элементарному объему металла. Такие напряжения наибо-

лее опасны, так как сопротивление металла образованию несплошностей в этом случае оказывается наименьшим.

Металлургические процессы в ядре характеризуются сходящимся ростом дендритов и скоплением в центре жидких или малопрочных составляющих расплава. Поэтому именно по центру наиболее вероятно нарушение сплошности точки под действием растягивающих напряжений.

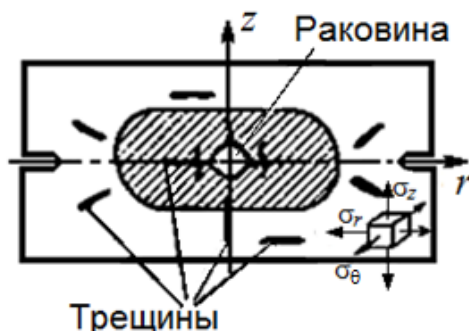


Рис. 2.25. Схема образования трещин и рыхлот при точечной сварке

К образованию рассеянных или сосредоточенных несплошностей (раковин) приводит недостаток металла при кристаллизации ядра без внешнего давления (пластического деформирования металла). В связи с обычно высоким начальным давлением в ядре и большой скоростью охлаждения у большинства материалов образование центральной раковины маловероятно.

Образование несплошностей наиболее часто наблюдается при сварке деталей толщиной свыше 1 мм из сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации. Как показали исследования, рыхлости и трещины образуются преимущественно в температурном интервале хрупкости (ТИХ), соответствующем минимальной пластичности сплава. Разрушение металла носит в этом случае межкристаллический характер. Верхняя граница ТИХ близка к температуре ликвидуса и составляет, например, для углеродистых и конструкционных сталей 1200–1350 °С. Обычно с увеличением интервала кристаллизации расширяется область ТИХ и возрастает склонность сплава к образованию горячих трещин. Наибольшую чувствительность к горячим трещинам обнаруживают легированные алюминиевые сплавы (Д16, АМг6), особенно при значительной величине проплавления (объеме расплавленного ядра). По этой же причине при сварке высокоуглеродистых сталей трещины наблюдаются чаще, чем при соединении низкоуглеродистой стали.

С другой стороны, увеличение количества легкоплавкой составляющей сплава (эвтектики) уменьшает вероятность образования трещин за счет увеличения пластичности сплава в ТИХ и возможности «залечивания» несплошностей и трещин жидкостью под действием усилия электродов.

В ядре трещины распространяются обычно от центра ядра в радиальном (вдоль оси  $r$ ) и осевом направлениях (вдоль оси  $z$ ) вплоть до наружной поверхности детали. Характер трещин в околошовной зоне зависит от положения участка разрушения. В области уплотняющего пояса трещины расположены под некоторым углом (часто  $45^\circ$ ) к поверхности листа (рис. 2.25). Это объясняется направлением главных растягивающих напряжений. Вблизи электродов градиент температур по оси  $r$  относительно мал, поэтому наибольшее значение имеют напряжения  $\sigma_z$  и при недостаточном усилии со стороны электродов трещины располагаются параллельно поверхности детали.

Механизм образования трещин в околошовной зоне иной. Они возникают под действием растягивающих напряжений в участках с закалочными структурами, образующимися при высокой скорости охлаждения, и называются холодными.

Резкое уменьшение плотности литого металла наблюдается при образовании конечного выплеска, так как в этом случае происходит своеобразное «зависание» электрода над деталью и ядро кристаллизуется при весьма малых давлениях.

Несплошности в околошовной зоне («усы») оказываются заполненными легкоплавким сплавом, обогащенным легирующими элементами, например медью при сварке Д16. Подобное явление связано, очевидно, с эффектом выдавливания металла расплавленных прослоек, находящихся по границам зерен, в возникающую при образовании трещин полость.

Отмеченные выше несплошности («усы», рыхлоты и т. д.) находятся вне зоны действия концентраторов напряжения и практически не оказывают влияния на статическую и усталостную прочность соединений. Но значительные внутренние напряжения и трещины, выходящие на поверхность, могут существенно снижать предел выносливости.

Основные меры борьбы с указанными дефектами заключаются в создании благоприятного напряженного состояния металла с низким уровнем растягивающих напряжений и даже всесторонним сжатием. Это достигается в первую очередь резким повышением усилия на электродах (в 2–3 раза) — проковкой соединения после выключения тока, когда металл находится в ТИХ.

При охлаждении и кристаллизации металла происходит быстрый рост растягивающих напряжений  $\sigma_p$ . Приложение ковочного усилия в момент времени  $t_k$  позволяет создать в центре ядра сжимающие напряжения  $\sigma_{сж}$ , а также способствует обжатию несплошностей и залечиванию их легкоплавкой составляющей сплава, поступающей из соседних участков металла. В ряде случаев удастся избежать образования трещин и рыхлот, уменьшая скорость охлаждения путем подогрева металла дополнительным импульсом тока.

#### 2.7.4. Снижение коррозионной стойкости соединений в результате сварки

На химическую стойкость сварных соединений при их эксплуатации в агрессивных средах влияют:

- загрязнение их поверхности материалом электрода;
- повреждение защитных покрытий;
- электрохимический потенциал при сварке разнородных материалов;
- механический фактор.

Снижение коррозионной стойкости соединений возникает в результате переноса части электродного металла на поверхность вмятины и может вызвать усиленную коррозию в этой части соединения, особенно у сплавов, чувствительных к коррозии в контакте с электроположительными элементами (например, на алюминиевых и магниевых сплавах в контакте с медью). Этот дефект называется в практике контактной сварки «загрязнением» поверхностей деталей.

Взаимодействие разнородных металлов в контакте электрод—деталь приводит, с одной стороны, к загрязнению рабочей поверхности электрода продуктами взаимодействия, с другой — к переносу электродного металла на поверхность детали.

Формирование физического контакта, активация атомов и возникновение металлических связей (схватывание) происходит в основном в результате процессов сдвиговой пластической деформации в области наибольших касательных напряжений (зоне скольжения).

Участки металлической связи служат каналами, по которым происходит диффузия металлов. Несмотря на малое время контактирования деталей при высокой температуре (в среднем менее 1 с), эти процессы часто получают достаточно большое развитие.

Особенно большую чувствительность к процессам взаимодействия обнаруживают алюминиевые и магниевые сплавы, а также стали с легкоплавкими покрытиями, например цинком. Указанное свойство этих металлов связано с возможностью появления жидкой фазы в отдельных участках контакта с электродом. Наличие жидкой фазы значительно ускоряет процессы диффузии. Активность взаимодействия зависит от свойств поверхностных пленок.

При сварке последующих точек ширина и глубина зоны взаимодействия в приконтактном слое расширяются, тем самым существенно изменяя его физико-химические свойства. По мере сварки ряда точек металл в пределах вмятины все более и более насыщается продуктами взаимодействия.

На определенном этапе требуется зачистка рабочей поверхности электрода для удаления продуктов взаимодействия, причем особенно часто это приходится делать при сварке магниевых сплавов (через 15–20 точек и через один оборот ролика при шовной сварке).

Для сохранения коррозионной стойкости соединений следует принимать меры к торможению процессов массопереноса. К таким технологическим мероприятиям можно отнести:

- тщательную подготовку поверхности деталей перед сваркой, в том числе для удаления продуктов, содержащих влагу и способствующих вторичному окислению поверхности электрода;
- использование жестких режимов, сокращающих пребывание металла при повышенных температурах;
- применение предварительного обжата деталей перед сваркой;
- нанесение на поверхность деталей барьерных веществ (минеральных масел), препятствующих массопереносу (схватыванию) и вторичному окислению электродов;
- снижение температуры электродов посредством использования электродных материалов с высокой теплопроводностью, интенсивного охлаждения электродов и роликов водой и в ряде случаев — жидкими газами;
- удаление продуктов массопереноса с поверхности соединений после сварки.

### **2.7.5. Изменение структуры и свойств металла ядра и околошовной зоны**

Изменение структуры и свойств металла ядра и околошовной зоны вызывается термомеханическим воздействием на металл соединений. Литой металл ядра отличается относительно низкой пластичностью, особенно при сварке металлов, чувствительных к термическому циклу, например конструкционных закаливающихся сталей.

Чаше всего при дендритной кристаллизации металла в центре ядра скапливаются (в результате ликвационных процессов) легкоплавкие компоненты, отличающиеся повышенной хрупкостью. Неравномерность состава ядра далеко не всегда удается устранить последующей термообработкой. Однако в большинстве случаев разрушение соединения происходит по металлу околошовной зоны, что в значительной степени снижает влияние свойств литого металла ядра на прочность сварного шва.

В околошовной зоне могут наблюдаться изменения исходной структуры и свойств сплава в результате развития ряда процессов, связанных с термическим циклом сварки: закалки, оплавления легкоплавких составляющих по границам зерен (эвтектик), отпуска, рекристаллизации и т. п. При соединении низкоуглеродистой стали в участке, непосредственно примыкающем к ядру, наблюдается оплавление границ зерен (пережог металла). Далее расположен участок перегрева, отличающийся крупнозернистым строением и участками оплавления границ зерен аустенита. В участках, которые были нагреты выше температуры  $A_{C3}$ , иногда обнаруживаются включения мартенсита, образующегося в результате быстрого охлаждения и торможения диффузии углерода. Для околошовной зоны характерно некоторое увеличение исходного зерна, что может привести к заметному снижению пластичности соединения, особенно при сварке холоднокатаной (наклепанной) стали.

Сварка закаливающихся сталей сопровождается более глубокими изменениями свойств металла, и в первую очередь — его пластичности. При сварке за-

каленной и отпущенной стали в околошовной зоне отмечаются участки мартенсита, отличающиеся малой пластичностью и небольшим сопротивлением образованию трещин. С увеличением содержания углерода и легирующих элементов в стали расширяется температурный интервал кристаллизации и усиливается склонность к закалке. Так, при сварке среднеуглеродистых и низколегированных сталей с эквивалентным содержанием углерода выше 0,45% скорость охлаждения зоны сварки как на жестком, так и на мягком режиме выше критической  $V_{кр}$  (рис. 2.26). Аустенит переходит в хрупкий и твердый мартенсит.

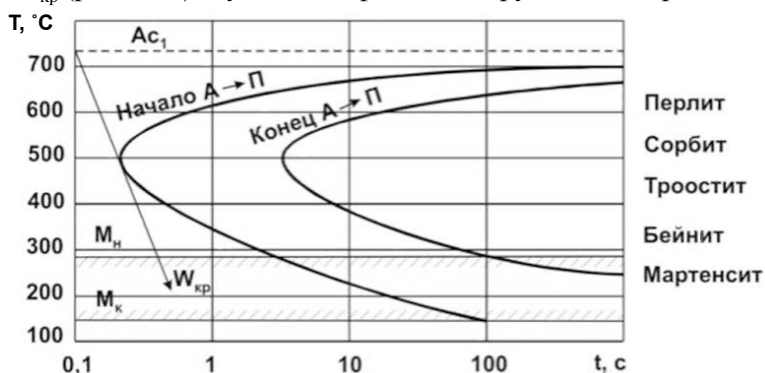


Рис. 2.26. Диаграмма изотермического распада аустенита доэвтектоидной среднеуглеродистой стали

При соединении высоколегированных, термически упрочняемых алюминиевых и магниевых сплавов возникает опасность оплавления легкоплавких составляющих, расположенных по границам зерен, и снижения пластичности сварных соединений (рис. 2.27).

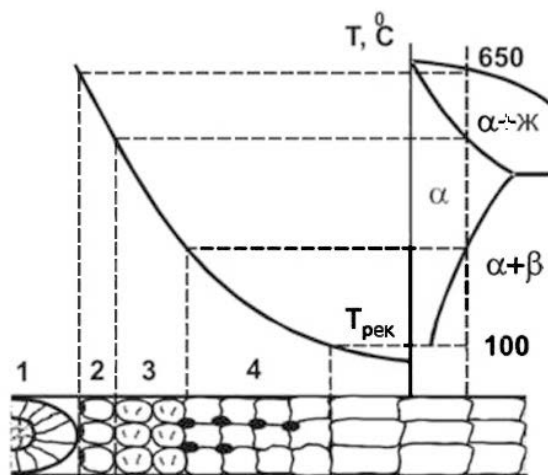


Рис. 2.27. Структура околошовной зоны при сварке закаленных и состаренных алюминиевых сплавов: 1 — ядро; 2 — зона частичного оплавления границ зерен; 3 — зона закалки; 4 — зона отпуска и рекристаллизации; 5 — исходная структура сплава

Сплавы, не упрочняемые термообработкой, например сплавы АМгб и МА2-1, склонны к рекристаллизации и укрупнению зерна, что может сказаться на снятии эффекта нагартовки и снижении прочности соединений.

Аустенитные стали, не стабилизированные введением карбидообразующих элементов (титана или ниобия), чувствительны к обеднению границ зерен хромом, что связано с диффузией углерода к границе зерна, и образованию на этих границах карбидов хрома. Подобное перераспределение примеси может привести к межкристаллитной коррозии. Однако заметное обеднение границ наблюдается при пребывании металла в интервале температур 550–700 °С более 1 мин.

Степень развития указанных выше процессов можно в значительной мере регулировать за счет режимов сварки. В частности, явления рекристаллизации, выпадения (растворения) составляющих сплава и т. д., зависящие от процессов диффузии, легко подавляются при применении жестких режимов сварки. Склонность к закалке может быть снижена при использовании многоимпульсных режимов, замедляющих скорость охлаждения.

Ширина зоны термического и механического влияния при точечной и шовной сварке, как правило, незначительна (иногда менее 1 мм) по сравнению с шириной этой зоны при других методах сварки в жидкой фазе, например при дуговой, вследствие малой длительности нагрева. Благоприятное влияние на свойства металла околошовной зоны оказывают в ряде случаев усилие сжатия и пластическая деформация, которая приводит к измельчению хрупких прослоек по границам зерен и снижению уровня растягивающих напряжений. Поэтому, как правило, сварные узлы, выполненные точечной и шовной сваркой, не нуждаются в последующей термообработке.



### 3. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

---

Образование соединения при стыковой сварке как оплавлением, так и сопротивлением происходит в результате совместной пластической деформации при осадке нагретых электрическим током торцов деталей. Физические процессы, протекающие при образовании соединения, во многом аналогичны процессам, протекающим при точечной сварке. Но существует и ряд достаточно важных особенностей, определяющих процессы образования металлических связей.

#### 3.1. Общая схема формирования соединения при стыковой сварке

---

Стыковая сварка сопротивлением и оплавлением происходит по единой схеме, состоящей из двух этапов:

- нагрева торцов деталей;
- осадки (рис. 3.1).

**Первый этап:**

- при стыковой сварке сопротивлением (рис. 3.1, *а*) по характеру процессов аналогичен первому этапу при точечной сварке до момента расплавления металла в контакте деталь—деталь: предварительное сжатие с усилием  $F_n$  (начальное усилие), нагрев контактной площадки при протекании сварочного тока, снижение сопротивления пластическим деформациям, деформация приконтактной области и снижение сопротивления контакта деталь—деталь;
- при стыковой сварке оплавлением (рис. 3.1, *б*) нагрев приконтактной области происходит в результате расплавления и разрушения локальных перемычек, образующихся при определенной скорости смыкания контактных поверхностей деталей (соприкосновения микронеровностей в зазоре  $\Delta_3$  — между деталями), вплоть до образования на торцах слоя расплавленного металла толщиной  $\delta_{ж}$ .

**Второй этап** как при сварке сопротивлением, так и оплавлением сопровождается значительной деформацией нагретых поверхностей в результате резкого увеличения усилия сжатия  $F_{ос}$  соединяемых поверхностей, т. е. осадкой.

Условия формирования межзатомных связей на втором этапе в результате пластических деформаций при осадке для сварки сопротивлением и оплавлением различны и определяются состоянием контактирующих поверхностей.

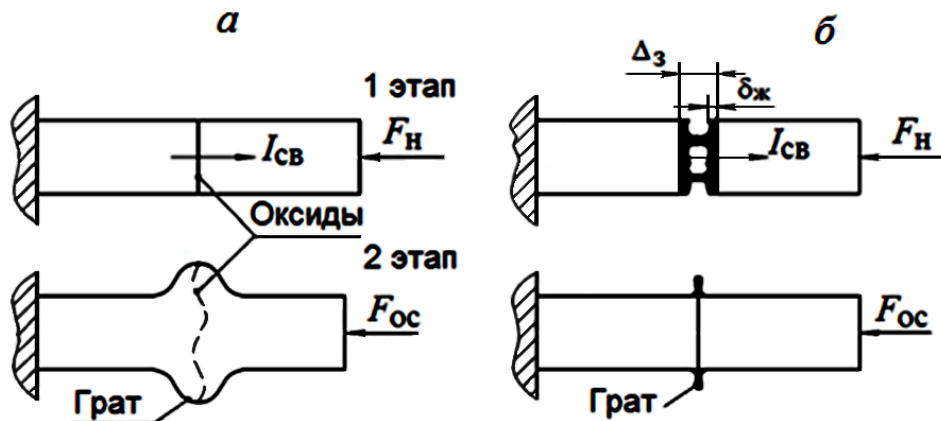


Рис. 3.1. Этапы образования соединений при стыковой сварке:  
 а — сопротивлением; б — оплавлением

При сварке сопротивлением нагрев торцевых поверхностей происходит практически до температур солидуса, но температуры плавления не достигает. При обычных условиях поверхности соединяемых деталей покрыты оксидными пленками, которые в результате пластических деформаций разрушаются и в процессе осадки удаляются в грат. Полного удаления оксидных пленок из зоны соединения может не произойти из-за относительно малых деформаций. Формирование металлических связей происходит в процессе сдвиговой пластической деформации металла в твердом состоянии.

При сварке оплавлением оксидные пленки находятся на поверхности тонкого слоя расплавленного металла, и при сжатии контактных поверхностей деталей они вместе с расплавом вытесняются в грат. Формирование связей происходит преимущественно в твердом состоянии и частично — в жидком.

### 3.2. Физические процессы, протекающие при стыковой сварке

Основные и сопутствующие процессы, определяющие формирование соединения, такие же, как при точечной сварке.

Основные:

- нагрев и охлаждение металла;
- пластическая деформация;
- удаление оксидных пленок.

Сопутствующие:

- изменения структуры и свойств металла;
- тепловое расширение и усадка металла;
- массоперенос в контакте электрод—деталь.

Последние два вспомогательных процесса — тепловое расширение и массоперенос — в большинстве случаев значительного влияния на качество соединений при стыковой сварке не оказывают.

При стыковой сварке сопротивлением (рис. 3.2, *a*) общая деформация деталей  $\Delta_{св}$ , определяемая перемещением  $s_n$  подвижной плиты машины, происходит в течение двух этапов формирования соединения, характеризующихся временем цикла сварки  $t_{ц.с}$ . Нагрев протекает на протяжении первого этапа и характеризуется временем нагрева  $t_n$ , образование межатомных связей происходит на втором этапе в результате значительных сдвиговых деформаций за время осадки  $t_{ос}$ .

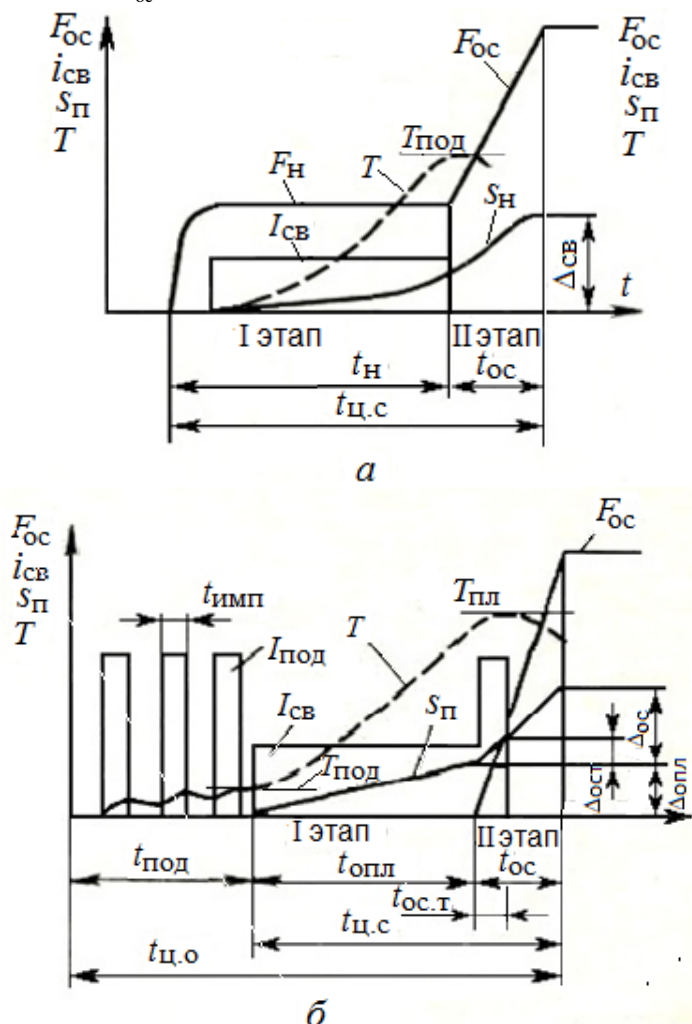


Рис. 3.2. Типовые циклограммы процесса стыковой сварки: *a* — сопротивлением; *б* — оплавлением

При стыковой сварке оплавлением ( $t_{ц.о}$  — цикл сварки оплавлением) на первом этапе формирования соединения (рис. 3.2, б) происходит оплавление деталей в течение времени  $t_{опл}$  (оплавления), за которое детали укорачиваются на длину  $\Delta_{опл}$ , на втором этапе происходит осадка, характеризующаяся общей деформацией деталей,  $\Delta_{ос}$ , часть которой происходит под током  $\Delta_{ос.т}$  за время  $t_{ос.т}$  (время осадки под током). На протяжении второго этапа происходит формирование металлических связей, обусловленное в основном сдвиговыми деформациями в приконтактной области и частично — за счет локальных участков, на которых остался расплавленный металл.

### 3.3. Процессы нагрева при стыковой сварке

#### 3.3.1. Источники теплоты при сварке

Нагрев деталей при стыковой сварке происходит за счет генерирования теплоты на электрических сопротивлениях при прохождении через них электрического тока.

Количество теплоты определяют, используя следующие уравнения:

$$Q_{э\text{э}} = \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t) r_{э\text{э}}(t) dt;$$

$$Q_{э\text{э}} = \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t) r_{к}(t) dt + \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t) 2r_{д}(t) dt.$$

Как следует из этих выражений, процессы тепловыделения при стыковой сварке по физической сущности подобны точечной сварке, тем не менее распределение количества теплоты, выделяемое на условных сопротивлениях (рис. 3.3), и их роль в формировании соединения отличны от происходящих в процессе точечной сварки.

Сопротивление электрод—деталь  $r_{эд}$  на нагрев стыка практически не влияет из-за сравнительно большой удаленности от зоны сварки и развитой площади контакта. Сопротивление деталей  $2r_{д}$  определяется удельным сопротивлением  $\rho_T$  (при средней температуре нагрева деталей), длиной  $l_0$  и площадью сечения  $S$ :

$$2r_{д} = k_n \rho_T l_0 / S,$$

где  $k_n$  — коэффициент поверхностного эффекта (заметно растет до температуры ферромагнитного превращения).

При сварке оплавлением сопротивление деталей  $2r_{д}$  в начале процесса оплавления имеет существенно меньшие значения по сравнению с контактным и мало влияет на нагрев деталей. В конце процесса оплавления сопротивление деталей  $2r_{д}$  возрастает в результате нагрева деталей.

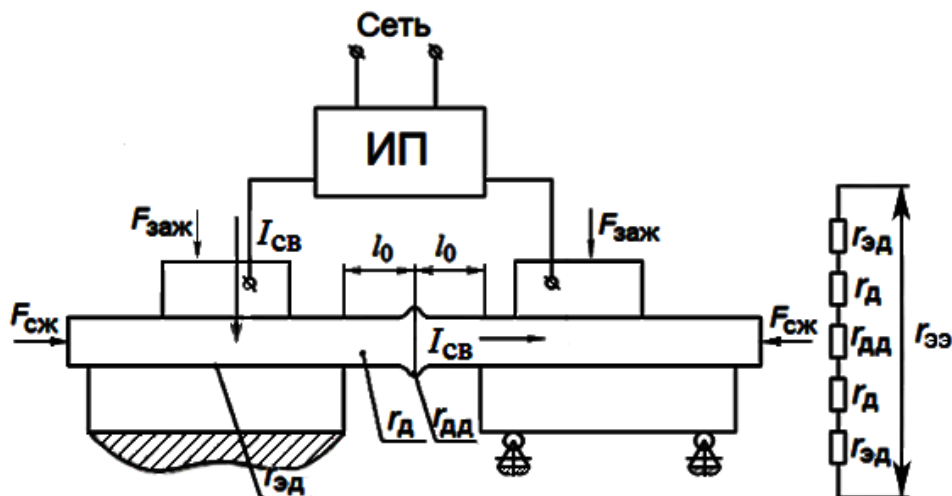


Рис. 3.3. Электрическое сопротивление зоны сварки: распределение сопротивлений и эквивалентная электрическая цепь

При сварке сопротивлением контактное сопротивление  $r_{\text{дд}}$  обычно в 1,5–2 раза больше, чем при точечной сварке, из-за сравнительно малого давления в контакте и при нагреве до соответствующей критической температуры  $T_{\text{кр}}$  снижается практически до нуля.

При сварке оплавлением контактное сопротивление  $r_{\text{дд}}$  определяется размером и числом перемычек в зазоре  $\Delta_z$ . При увеличении числа одновременно существующих перемычек, а также их сечения оно уменьшается, что происходит в конечной стадии оплавления. К концу оплавления скорость сближения деталей возрастает, а благодаря увеличению при этом количества и размеров перемычек  $r_{\text{дд}}$  уменьшается.

Численное значение контактного сопротивления при сварке сталей можно определить по следующей эмпирической зависимости:

$$r_{\text{дд}} = 9500 k_1 / \left( S^{2/3} v_{\text{опл}}^{1/3} j_{\text{опл}} \right),$$

где  $k_1$  — коэффициент, учитывающий свойства оплавляемой стали (для углеродистых конструкционных сталей — 1, для аустенитных сталей — 1,1);

$S$  — площадь торца свариваемых деталей,  $\text{см}^2$ ;

$v_{\text{опл}}$  — скорость оплавления,  $\text{см/с}$ ;

$j_{\text{опл}}$  — плотность тока в деталях,  $\text{А/мм}^2$ .

Среднее значение  $r_{\text{дд}}$  при сварке сталей оплавлением составляет обычно 100–1500 мкОм.

При стыковой сварке сопротивлением общий характер изменения  $r_{\text{дд}}$ ,  $r_{\text{д}}$ ,  $r_{\text{эд}}$ , а следовательно, и  $r_{\text{ээ}}$  (рис. 3.4, а) в значительной степени напоминает характер их изменения при точечной сварке (см. рис. 2.8). Суммарное сопротивление  $r_{\text{ээ}}$  к концу оплавления снижается (рис. 3.4, б), а при осадке становится равным  $2r_{\text{д}} + 2r_{\text{эд}}$ .

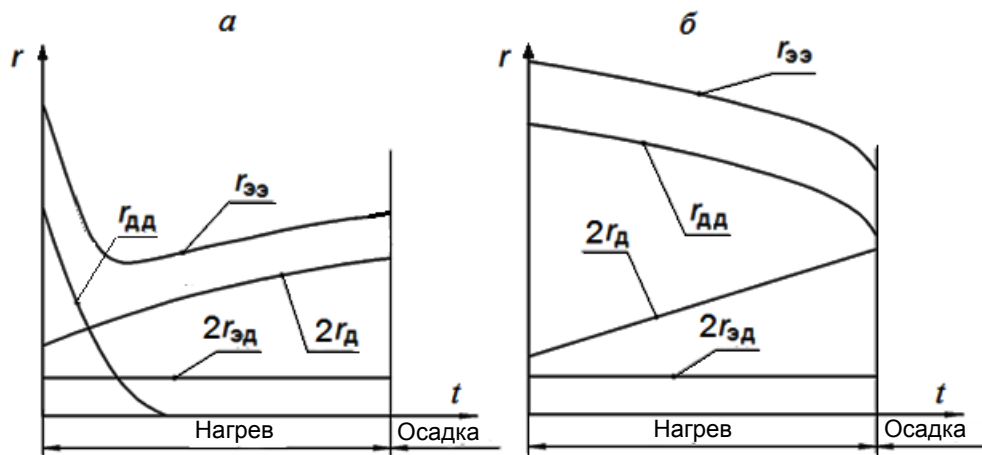


Рис. 3.4. Характер изменения электрических сопротивлений при сварке:  
а — сопротивлением; б — оплавлением

### 3.3.2. Тепловые процессы при стыковой сварке сопротивлением

Характер изменения контактного сопротивления определяет процессы нагрева деталей в зоне сварки. Процесс тепловыделения начинается в контакте деталей и активизируется в узкой области контакта, где наблюдается интенсивный рост температуры. Большая часть теплоты выделяется за относительно короткий интервал времени, но и после снижения контактного сопротивления  $r_{\text{дд}}$  (практически до нуля) нагрев продолжается до конца цикла, так как эта зона нагрета больше, чем другие участки деталей. На контактном сопротивлении обычно выделяется не более 10–15 % от общего количества теплоты, генерируемого за цикл в зоне сварки.

Интенсивность тепловыделения в контакте сильно зависит от начального давления (для сталей обычно не превышает 15–30 МПа). Очевидно, что при уменьшении усилия сжатия при прочих равных условиях интенсивность тепловыделения будет возрастать, но повысится и неравномерность нагрева по сечению контакта деталей, которая связана со случайным характером распределения контактных участков. Неравномерность нагрева возрастает с увеличением сечения и особенно сильно проявляется при сварке деталей

с развитым сечением. Неравномерность распределения контактных участков является серьезным недостатком процесса сварки сопротивлением.

Нагрев при сварке сопротивлением можно привести к схеме наложения двух процессов:

1) нагрева (до температуры  $T_1$ ) бесконтактного стержня теплотой, равномерно выделяемой на собственном сопротивлении по всей его длине (рис. 3.5);

2) нагрева этого же стержня (до температуры  $T_2$ ) теплотой, выделяемой в стыке и распространяющейся в стороны от него.

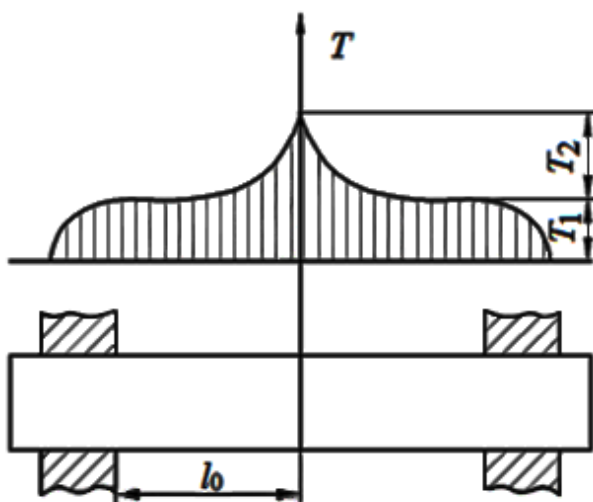


Рис. 3.5. Распределение температур при сварке сопротивлением

Теплота, выделяемая на единице длины стержня сечением  $S$ , плотностью  $\gamma$ , удельной теплоемкостью  $c$  и средним удельным сопротивлением  $\rho_T$ , при протекании через него тока  $I_{cb}$  в течение  $t_{cb}$  определяется по формуле

$$Q_1 = \rho_T I_{cb}^2 t_{cb} / S \quad (3.1)$$

Эта теплота расходуется на нагрев стержня до температуры  $T_1$ , которая описывается уравнением

$$k_2 Q_1 = S c \gamma T_1, \quad (3.2)$$

где коэффициент  $k_2$  учитывает потери на нагрев электродов (токоподводов) и в результате лучеиспускания (численное значение этого коэффициента для деталей: из углеродистых конструкционных сталей —  $k_2 \approx 0,75$ ; из аустенитных сталей —  $k_2 \approx 0,9$ ).

Из уравнений (3.1) и (3.2) находят температуру:

$$T_1(x) = \frac{k_2 \rho_T I_{cb}^2 t_{cb}}{c \gamma S^2}. \quad (3.3)$$

Температура  $T_2(x, t)$  в любой точке на расстоянии  $x$  от плоскости стыка определяется аналитически в предположении, что вся теплота:

- генерируется током за время сварки в сопротивлении контакта;
- выделяется в нем мгновенно в начале процесса, а затем постепенно распространяется вдоль свариваемых деталей.

Рассчитанная по этой схеме температура в стыке в начальный момент достигает бесконечности. Тем не менее в представляющей практический интерес конечной стадии процесса такой расчет дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментально полученными температурами.

Температуру  $T_2(x, t)$  определяют по формуле

$$T_2(x, t) = Q_2 \exp(\beta \omega_0 t - x^2 / 4at) / c\gamma \sqrt{4at}, \quad (3.4)$$

где  $Q_2 = \frac{\mu \sqrt{\lambda c \gamma}}{\beta j \sqrt{(\beta \rho_0) / (c \gamma_0)}};$

$\beta$  — температурный коэффициент, учитывающий изменение удельного электросопротивления при изменении теплоемкости металла;  $\mu$  — коэффициент, характеризующий интенсивность тепловыделения в контакте и зависящий от свойств металла и давления. Экспериментально получены следующие значения коэффициента  $\mu$ : для низкоуглеродистой стали — 2,5–3; стали 12Х18Н9Т — 0,07–0,08; алюминия — 0,34–0,36; меди — 0,4–0,15. Большим давлениям соответствуют меньшие значения  $\mu$ .

Поскольку процесс распространения теплоты при сварке сопротивлением описывается уравнением

$$T(x, t) = T_1(x) + T_2(x, t), \quad (3.5)$$

то, пользуясь формулами (3.3) и (3.4), можно рассчитать по формуле (3.5) температуру в стыке и прилегающей к нему зоне в любой момент времени.

### 3.3.3. Тепловые процессы при стыковой сварке оплавлением

Роль оплавления заключается в нагреве деталей до момента образования на торцах слоя расплавленного металла. Слой расплава обеспечивает более равномерное распределение температур в области контакта, тем самым создавая благоприятные условия для формирования соединения и удаления поверхностных оксидов вместе с расплавом в процессе пластической деформации при осадке. Вышеуказанные процессы могут быть реализованы непрерывным оплавлением или оплавлением в сочетании с предварительным контактным подогревом.

Нагрев при оплавлении в основном происходит за счет теплоты, выделяющейся в контактном сопротивлении  $r_{\text{дл}}$ , определяемом состоянием пере-



мычек расплавленного металла в искровом промежутке. Доля теплоты, выделяемой на собственном сопротивлении деталей  $2r_d$  из-за сравнительно малой средней плотности тока, как правило, мала и не учитывается при тепловых расчетах.

Процесс нагрева обычно представляют следующей схемой. В процессе сближения деталей, находящихся под напряжением источника, в момент их соприкосновения при сравнительно небольшом давлении, на поверхности торцов между их локальными участками образуются электрические контакты. При прохождении тока через контакты происходит их быстрое плавление и образование перемычек из жидкого металла (рис. 3.6). Перемычки разрушаются с высокой скоростью, длительность их существования обычно не превышает 0,001–0,005 с.

Форма и размеры перемычек определяются действием двух сил, направленных противоположно (рис. 3.6, а):

- сил поверхностного натяжения  $\sigma$ , стремящихся при сближении деталей уменьшить зазор  $\Delta_3$ , увеличить диаметр перемычки  $d_n$ ;
- электромагнитных сил  $F_c$  (пропорциональных квадрату протекающего через них тока), стремящихся сжать и разрушить перемычку.

В результате сжатия перемычки увеличивается плотность протекающего тока и, следовательно, скорость нагрева. При достижении большой плотности тока (например, порядка 3000 А/мм<sup>2</sup> при оплавлении низкоуглеродистой стали) металл в центре перемычки интенсивно испаряется и вызывает ее взрывообразное разрушение от сил действия паров  $F_n$ . В момент взрыва давление паров достигает 10–20 МПа, а температура — 6000–8000 °С. Капли расплавленного металла выбрасываются из зазора в виде искр (со скоростью, превышающей 60 м/с), что приводит к постепенному уменьшению длины деталей.

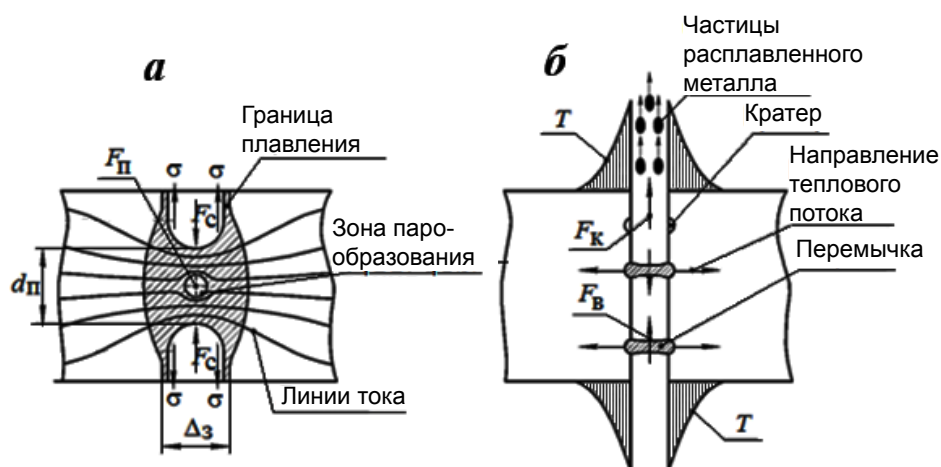


Рис. 3.6. Схемы расположения перемычек расплавленного металла при оплавлении: а — образование перемычки и действующие на нее силы; б — разрушение перемычек

Перемычки являются источниками теплоты, часть которой в течение времени их существования передается теплопроводностью торцам деталей. Увеличение времени существования перемычек вызывает снижение градиента температуры в деталях. Разрушение перемычек и выброс нагретого металла за пределы зоны сварного соединения приводит к потерям накопленной тепловой энергии. В результате разрушения перемычек на торцах образуются кратеры, глубина и диаметр которых зависят от размера перемычки. Между одновременно существующими перемычками, как между проводниками с током одинакового направления, действуют электромагнитные силы  $F_v$  (рис. 3.6, б), стремящиеся их объединить, но из-за малого времени существования перемычек объединение обычно не завершается.

Силы  $F_k$ , вызванные взаимодействием тока в перемычках с магнитным полем сварочной машины, способствуют их перемещению в искровом промежутке и выталкиванию из сварочного контура.

В начале оплавления распределение температуры на оплавленных торцах неравномерно (рис. 3.7, а). Затем степень неравномерности по мере нагрева уменьшается.

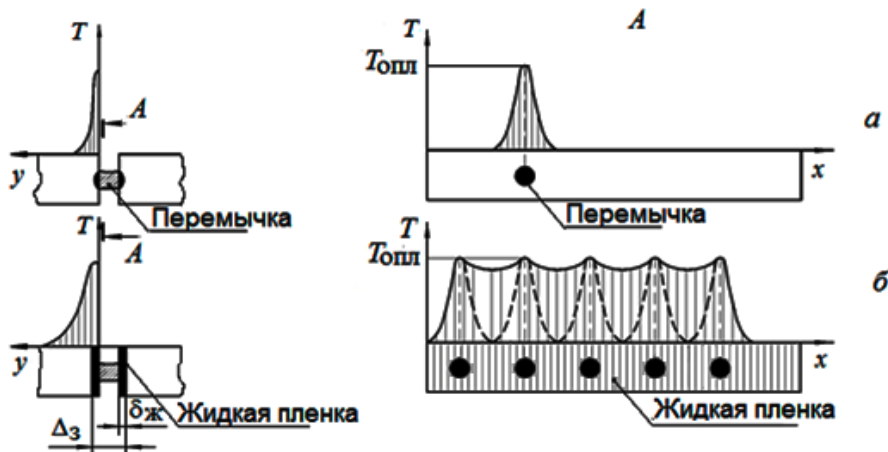


Рис. 3.7. Схема распределения температуры при сварке оплавлением: а — в начальной стадии процесса; б — в конечной стадии процесса

Расплавленные участки появляются с начала процесса оплавления, средняя температура торцов растет до образования на их поверхности равномерного слоя расплавленного металла.

Для установившегося процесса оплавления характерно многократное с высокой частотой образование перемычек по всей поверхности торцов деталей, что приводит к возникновению равномерного слоя расплава на торцах (рис. 3.7, б).

Для процесса оплавления характерны высокие локальные плотности тока в перемычках и малая средняя плотность тока, отнесенная ко всему сечению деталей.

Электрические процессы при сварке оплавлением имеют сложный характер, поскольку обеспечиваются источником переменного тока (рис. 3.8). Образование одного контакта при сближении торцов (рис. 3.8, *а*) снижает напряжение источника от значения  $U_{2x}$  до  $U_{33}$  (точка 1). При увеличении тока  $I_{св}$  по синусоиде напряжение ( $U_{33} = r_{33} i_{св}$ ) несколько возрастает, а затем после разрушения перемычки (точка 2) резко увеличивается (точка 3), превышая  $U_{2x}$  за счет запасенной в магнитном поле машины энергии. Текущее значение напряжения холостого хода  $U_{2x}$  восстанавливается, исчерпав запасенную энергию (точка 4). Процесс повторяется по мере возникновения очередных единичных контактов, обычно наблюдается 4–7 пульсаций тока за полупериод (0,01 с). При снижении тока до нуля на кривой  $U_{33}$  могут возникать пульсации напряжения со значениями, часто превышающими  $U_{2x}$ . Таков механизм образования одиночных перемычек. Если снижения тока до нулевого значения не происходит, а пульсации напряжения уменьшаются (рис. 3.8, *б*), это означает одновременное существование нескольких перемычек и несинхронное их разрушение.

В некоторых случаях дополнительным источником теплоты становятся дуговые разряды, нагревающие металл до более высоких температур. Разряды возникают при высоких значениях напряжения источника  $U_{2x}$ , малой длительности существования перемычек, небольшой работе выхода электронов и большой индуктивности контура машины.

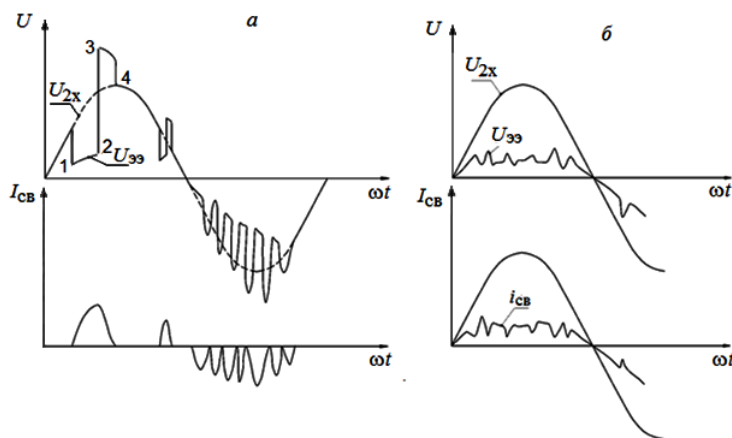


Рис. 3.8. Электрические процессы при оплавлении: *а* — одиночные перемычки; *б* — несколько одновременно существующих перемычек

Возбуждение дуги происходит при полном размыкании торцов, когда запасенная в магнитном поле энергия вызывает перенапряжение и в резуль-

тате возникает пробой промежутка между торцами деталей (рис. 3.8, а, точка 3). При возникновении следующей перемычки дуга гаснет из-за шунтирования тока. При сварке деталей (небольших сечений) из алюминиевых сплавов до 50 % тепловой энергии при оплавлении приходится на долю дуговых разрядов. Доля тепла, выделяющаяся за счет дуговых разрядов, мала при сварке металлов и сплавов с большим значением работы выхода, а также при большом сечении деталей.

Одной из важнейших характеристик процесса оплавления является его скорость ( $v_{\text{опл}}$ ). Она оказывает существенное влияние и на весь процесс сварки, качество сварного соединения, в частности определяет температурное поле в целом и равномерность его распределения, рельеф поверхности и степень окисления металла торцов. Для конкретных условий сварки существует некоторая оптимальная средняя скорость оплавления, которая обеспечивает наилучшие показатели качества соединений.

Увеличение средней скорости ( $V_{\text{опл. ср}} = \Delta_{\text{опл}} / t_{\text{опл}}$ ) оплавления (при оплавлении на одну и ту же величину ( $\Delta_{\text{опл}}$ )) приводит к сужению зоны нагрева деталей, а следовательно, к увеличению градиента температур  $dT/dx$ , уменьшению времени существования перемычек. Интенсивное оплавление приводит к более равномерному нагреву торцов. Вместе с тем повышение скорости способствует ухудшению рельефа поверхности торцов из-за увеличения кратеров вследствие роста размера перемычек.

Снижение скорости увеличивает длительность существования перемычек и глубину прогрева деталей, уменьшает градиент температуры. Размеры перемычек уменьшаются, а рельеф поверхности улучшается, но снижается равномерность нагрева.

Существует некоторая постоянная скорость ( $v_{\text{опл}}$ ), которая после оплавления на некоторую величину ( $\Delta_{\text{опл}}$ ) и формирования слоя расплавленного металла на торцах приводит к квазистационарному состоянию, характеризующемуся малым изменением температурного поля при дальнейшем оплавлении. Величина этой скорости зависит от условий оплавления и теплофизических свойств свариваемых металлов.

Устойчивость процесса оплавления — важная характеристика энергетической системы источник — сварочный контур — привод перемещения — искровой промежуток. Для обеспечения непрерывного оплавления без длительных коротких замыканий деталей или длительных перерывов в протекании тока необходимо, чтобы мгновенная скорость сближения деталей  $v_{\text{сбл}}$  соответствовала мгновенной скорости оплавления  $v_{\text{опл}}$  (скорости фактического укорочения свариваемых деталей). При  $v_{\text{сбл}} \gg v_{\text{опл}}$  зазор  $\Delta_3$  уменьшится, а диаметр перемычек увеличится настолько, что их разрушение станет невозможным, поэтому произойдет короткое замыкание деталей и оплавление прекратится. При  $v_{\text{сбл}} \ll v_{\text{опл}}$  образование и разрушение перемычек сопровождается увеличением зазора  $\Delta_3$ , что приведет к прекращению процесса оплавления.

Мгновенная скорость оплавления зависит от интенсивности нагрева и плавления металла на торцах деталей и перегрева части расплава до температуры кипения. Это определяется тепловой мощностью (количеством теплоты, выделяемой в секунду), развиваемой в искровом промежутке при оплавлении:

$$q_{\text{опл}} = r_{\text{дд}} I_{\text{св}}^2 k,$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий неполнофазность переменного тока  $k \approx 0,75-0,8$ .

Она расходуется на нагрев от температуры  $T_1$  до  $T_{\text{опл}}$  металла, выбрасываемого из зазора в виде искр и брызг  $q_{\text{искр}}$ , и на теплопередачу в детали  $q_{\text{дет}}$ :

$$q_{\text{опл}} = q_{\text{искр}} + q_{\text{дет}} = v_{\text{опл}} S \gamma [c(T_{\text{опл}} - T_1) + m_0] + 2\lambda S dT/dx,$$

где  $S$  — сечение детали;

$c, \gamma, \lambda, m_0$  — удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и скрытая теплота плавления свариваемого металла;

$T_{\text{опл}}$  — средняя температура выбрасываемого при оплавлении металла (для стали  $T_{\text{опл}} = 2000^\circ\text{C}$ );

$T_1$  — средняя температура торцов (в начале оплавления — окружающей среды, к его концу — близкая к температуре плавления, при сварке с подогревом  $T_1 = T_{\text{под}}$ );

$dT/dx$  — градиент температуры торца.

Отсюда  $v_{\text{опл}}$  после подстановки вместо  $q_{\text{опл}}$  его значения:

$$v_{\text{опл}} = kr_{\text{дд}} I_{\text{св}}^2 - 2\lambda S \left( \frac{dT}{dx} \right) / \{ S c (T_{\text{опл}} - T_1) + m_0 \}.$$

Следовательно, мгновенная скорость оплавления растет с увеличением тепловой и полезной мощности ( $P_{\text{э}} = q_{\text{опл}} = r_{\text{дд}} I_{\text{св}}^2 k$ ), с уменьшением градиента температуры  $dT/dx$  и повышением температуры торцов  $T_1$ . В начале процесса, когда  $dT/dx$  велик и  $T_1 \leftrightarrow 0$ , оплавление идет медленно. По мере подогрева торцов  $v_{\text{опл}}$  растет. Для поддержания устойчивого процесса оплавления при неизменной мощности скорость сближения деталей  $v_{\text{сбл}}$  должна постепенно увеличиваться, чтобы соответствовать нарастающей  $v_{\text{опл}}$ . Подогрев деталей до  $T_1 = T_{\text{под}}$  увеличивает возможную скорость их сближения при данной мощности.

Другие факторы и приемы повышения устойчивости оплавления:

- использование эффекта саморегулирования;
- предварительный подогрев деталей перед оплавлением;
- программное управление параметрами режима;
- автоматическое управление оплавлением;
- импульсное управление оплавлением.

Сущность саморегулирования заключается в реакции энергетической системы на внешние и внутренние возмущения сварочного процесса. В про-

цессе сварки сопротивление  $r_{\text{дд}}$  непрерывно снижается, что могло бы привести к нарушению стабильности оплавления. Ответной реакцией процесса является рост тока  $I_{\text{опл}}$ . Для поддержания устойчивого оплавления снижение  $r_{\text{дд}}$  должно быть компенсировано быстрым повышением еще и полезной мощности  $P_{\text{эз}}$ .

Зависимость полезной мощности от сварочного тока имеет вид

$$P_{\text{эз}} = I_{\text{св}} \sqrt{U_{2x}^2 - I_{\text{св}}^2 x_{\text{м}}^2} - I_{\text{св}}^2 r_{\text{м}}.$$

Эта зависимость носит экстремальный характер. Максимальное значение  $P_{\text{эз}}$  соответствует равенству  $r_{\text{дд}} = Z_{\text{м}}$ . Если  $r_{\text{дд}} < Z_{\text{м}}$ , то малейшее снижение сопротивления  $r_{\text{дд}}$  приводит к прогрессирующему снижению  $P_{\text{эз}}$ , короткому замыканию и прекращению оплавления. Но обычно  $r_{\text{дд}} > Z_{\text{м}}$ , и по мере снижения  $r_{\text{дд}}$  мощность увеличивается, в результате чего происходит активное разрушение перемычек и, следовательно, будет сохраняться непрерывное оплавление. Таким образом, выражение  $r_{\text{дд}} > Z_{\text{м}}$  является необходимым условием устойчивости процесса оплавления. Поэтому для сварки оплавлением рекомендуются системы питания с очень жесткими характеристиками — трансформаторы с минимальным магнитным рассеянием и предельно короткие сварочные контуры.

Предварительный подогрев торцевой части деталей выполняется за счет их короткого замыкания перед сваркой непосредственно в губках сварочной машины. В этом случае снижается необходимая для начального возбуждения оплавления электрическая мощность, увеличивается глубина прогрева деталей. Для возбуждения процесса и устойчивого оплавления деталей необходим 3—5-кратный запас устойчивости, который представляет собой отношение тока короткого замыкания к среднему току при оплавлении:  $I_{\text{кз}}/I_{\text{св}}$ . Большее отношение применяют при сварке больших компактных сечений.

Быстро достичь устойчивого оплавления позволяет скос торцов деталей, когда вначале в контакт вступает лишь часть площади сечения сварного соединения.

Программное управление током и скоростью оплавления (рис. 3.9) может выполняться по жесткому, т. е. заранее заданному, алгоритму, с помощью двух исполнительных устройств — тиристорного регулятора в цепи сварочного трансформатора и двигателя в составе механического привода оплавления. При программном управлении током для возбуждения оплавления напряжение  $U_{2x}$  вначале увеличивают (в течение  $0,1 t_{\text{опл}}$ ). Повышение  $U_{2x}$  ускоряет разрушение перемычек и сужает зону нагрева. По мере прогрева деталей и стабилизации оплавления  $U_{2x}$  снижают и поддерживают постоянным (в течение  $0,7 t_{\text{опл}}$ ). В конце оплавления, перед осадкой  $U_{2x}$  снова кратковременно увеличивают для повышения локальной устойчивости процесса, т. е. обеспечения равномерного прогрева по всей площади обоих торцов. Программное управление скоростью оплавления  $v_{\text{опл}}$  обычно также вы-

полняется с жестким алгоритмом. Часто применяют параболический закон сближения деталей, при котором скорость линейно возрастает со временем по соотношению  $v_{\text{опл}} = kt$ . При одновременном программном управлении током и скоростью в 3–5 раз снижается потребляемая мощность и в 1,5–2 раза — время сварки.

Автоматическое регулирование параметров режима — сложный, но и более эффективный прием повышения устойчивости и качества сварки. Различают системы стабилизации параметров и системы программного регулирования.

Регулирующие воздействия в обоих вариантах передаются на источник и привод. В системах стабилизации в качестве регулируемых величин, контролируемых датчиками в цепях обратной связи, принимаются следующие сигналы: напряжение  $U_{\text{э}}$ , сварочный ток  $I_{\text{св}}$ , частота пульсации  $f_{\text{п}}$ , реже — температура торцов деталей и др. Системы программного регулирования отличаются от систем стабилизации и жесткого программного управления наличием заданной программы изменения параметров режима по ходу сварки и цепей обратных связей, с помощью которых контролируется ее выполнение.

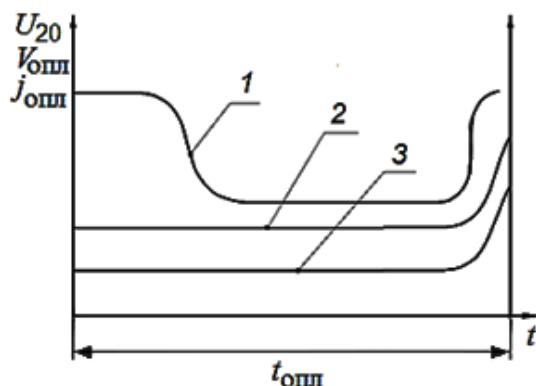


Рис. 3.9. Программа изменения напряжения  $U_{2x}(t)$ , скорости оплавления  $v_{\text{опл}}(t)$  и плотности тока  $j_{\text{опл}}(t)$

Импульсное оплавление — специальный метод, разработанный для сварки сверхбольших сечений (более 10000 мм<sup>2</sup>). При импульсном оплавлении на основное поступательное движение, которое совершает подвижная плита сварочной машины, накладываются дополнительные колебания (с частотой  $f_k = 3\text{--}45$  Гц и амплитудой  $A_k = 0,1\text{--}0,8$  мм). На рис. 3.10, а–в штриховыми стрелками показано колебательное перемещение, сплошными — поступательное. Колебания плиты с одной из деталей вызывают периодическое высокоскоростное изменение зазора между деталями.

В стадии уменьшения зазора идут процессы частичного оплавления и разрушения преимущественно мелких перемычек, а также одновременно на-

грев, деформация и увеличение площади другой части контактов, которая была нагрета до температуры, близкой к температуре плавления.

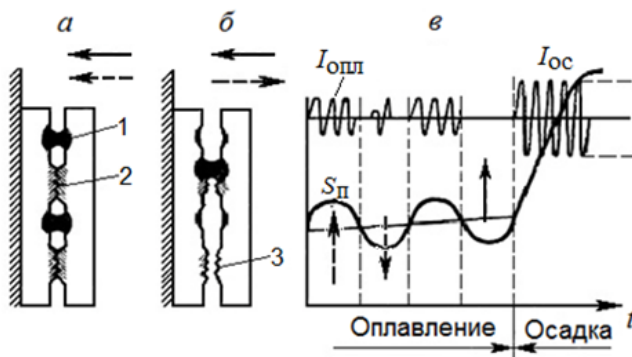


Рис. 3.10. Импульсное оплавление: *a* — стадия уменьшения зазора (*1* — жидкая перемычка; *2* — деформируемый контакт); *б* — стадия увеличения зазора (*3* — механическое разрушение контакта); *в* — осциллограмма сварочного тока  $i_{св}$  и перемещения  $S_n$  подвижной плиты

В стадии увеличения зазора эти контакты механически разрушаются и лишь частично оплавляются вследствие большой скорости увеличения зазора. При таком режиме увеличивается время существования в зазоре нагретого металла и снижаются потери, связанные с плавлением и разрушением перемычек. Импульсное оплавление по сравнению с непрерывным можно осуществлять при более низких напряжениях  $U_{2х}$ ; при этом на 10–15 % повышается температура в околошовной зоне, в 3–4 раза сокращается время оплавления, в 2–2,5 раза снижается расход электроэнергии и в 3–4 раза — припуск на оплавление.

### 3.4. Пластическая деформация металла при стыковой сварке

Роль пластической деформации заключается:

- в формировании электрических контактов (первый этап);
- в удалении оксидов из зоны соединения (преимущественно второй этап);
- в создании условий для образования металлических связей в стыке (второй этап цикла).

Деформация обеспечивается приводом сварочной машины, создающим необходимое усилие сжатия.

Начальный электрический контакт образуется при давлении:

- сварка сопротивлением — 5–10 МПа;
- сварка оплавлением — порядка 0,001 МПа.



Такого давления достаточно для микропластической деформации рельефа торцевой поверхности деталей. Сравнительно небольшое давление обуславливает высокие контактные сопротивления. Таким образом, низкое начальное давление обеспечивает локализацию тепловыделения и быстрый нагрев металла в необходимой области соединения — по торцам свариваемых заготовок.

Для образования металлических связей, удаления оксидов требуется объемная пластическая (сдвиговая) деформация торцов деталей, которая обеспечивает интенсивное вытеснение нагретых слоев металла приконтактной зоны вместе с оксидами области контакта.

При сварке оплавлением удаление оксидов значительно затрудняется при образовании глубоких кратеров, поэтому степень объемной пластической деформации, а следовательно, и усилие осадки необходимо увеличивать.

Стыковая сварка в большинстве случаев реализуется по свободной схеме объемной деформации, при которой нет какого-либо внешнего ограничения на перемещение слоев металла вдоль оси  $z$  (рис. 3.11, *а*).

В центре торца в точке А имеет место всестороннее неравномерное сжатие (действуют сжимающие напряжения, осевые  $\sigma_x$ , радиальные  $\sigma_r$  и окружные  $\sigma_\theta$ ). Напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_r$  формируют преимущественно деформации, действующие в плоскости стыка соединяемых деталей. В точке В, в плоскости стыка ближе к периферии контакта, действуют напряжения двустороннего сжатия  $\sigma_x$  и  $\sigma_r$ , а напряжения  $\sigma_\theta$  меняют знак и становятся растягивающими. В точке Б на периферии стыка действует двустороннее сжатие ( $\sigma_x$  и  $\sigma_r$ ) с растяжением ( $\sigma_\theta$ ).

Неблагоприятный термдеформационный цикл может вызвать чрезмерное увеличение радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  напряжений, вследствие чего последует раскрытие зазора, расслоение и искривление волокон металла, а также образование продольных трещин в процессе охлаждения и усадки металла.

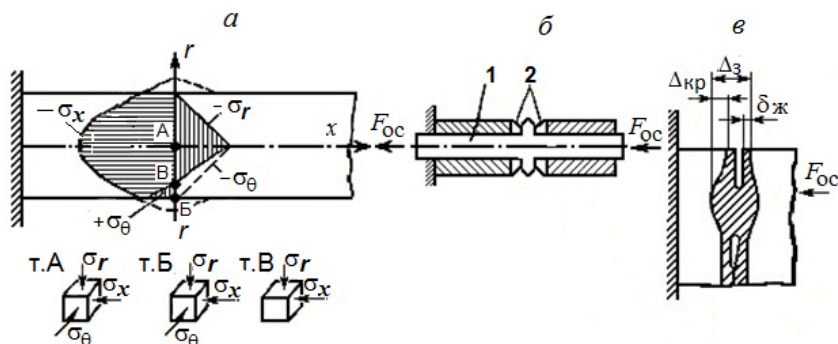


Рис. 3.11. Деформация металла при осадке: *а* — схема свободной деформации; *б* — схема принудительной деформации (1 — свариваемые детали; 2 — формирующие зажимы); *в* — начальный момент осадки

Характеристикой объемной пластической деформации может служить отношение конечной площади сечения торцов к начальной площади (до сварки)  $k_{пл} = S_{кон}/S_{нач}$ .

При мягких режимах сварки снижается градиент температур  $dT/dx$ , увеличивается протяженность околошовной зоны и  $k_{пл}$  соответственно растет. При жестких режимах градиент температур  $dT/dx$  существенно больше, околошовная зона локализована вблизи стыка, поэтому  $k_{пл}$  меньше, так как деформируется относительно короткий участок свариваемых деталей.

При сварке сопротивлением максимальное значение  $k_{пл}$  не должно превышать 4, дальнейшее увеличение  $k_{пл}$  приводит к нарушению монолитности металла зоны сварки. Такая степень деформации в некоторых случаях полного удаления оксидов может не обеспечивать. Для полного вытеснения оксидов, активизации поверхности и образования металлических связей необходимо увеличение степени всестороннего сжатия, что может быть достигнуто посредством схемы принудительного формирования стыка в специальных зажимах 2 (рис. 3.11, б), между которыми локализуется деформация, в результате чего возможно существенное увеличение напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  в точке Б (рис. 3.11, а).

При сварке оплавлением качественное соединение с полным удалением оксидов получают при  $k_{пл} < 2$ , что связано с наличием жидкого металла в стыке и возможностью сварки на относительно жестких режимах. Величину деформации при стыковой сварке оценивают по укорочению деталей  $\Delta_{ос}$  в процессе осадки. При стыковой сварке оплавлением деформация обычно определяется не только величиной  $\Delta_{ос}$ , но и в значительной степени давлением  $P_{ос}$ , а также скоростью осадки  $v_{ос}$ . Величина  $\Delta_{ос}$  должна быть достаточной для полного закрытия зазора  $\Delta_3$ , вытеснения окисленного и расплавленного металла ( $2\delta_{ж}$ ), а также для обеспечения достаточной пластической деформации металла, в частности в целях устранения рельефа поверхности (кратеров  $2\Delta_{кр}$ ) (рис. 3.11, в). Значение  $\Delta_{ос}$  определяется главным образом рельефом поверхности торцов.

### 3.5. Удаление поверхностных пленок при стыковой сварке

Оксидные пленки на торцевой поверхности деталей оказывают решающее влияние на процесс образования соединения и его качество при стыковой сварке. Они затрудняют межатомное взаимодействие и препятствуют формированию устойчивых металлических связей. Оксидные пленки должны быть раздроблены и удалены из зоны соединения в процессе пластической деформации при осадке.

При стыковой сварке торцы не защищены от взаимодействия с атмосферой. Наиболее активно развиваются процессы окисления при сварке сопротивлением. Для сварки оплавлением характерно непрерывное обновление

металла на торцах, образование большого количества капель, паров металла и некоторых газов в зазоре (например, при сварке сталей монооксида углерода CO), связывающих кислород и другие газы при взрыве перемычек, что значительно снижает интенсивность взаимодействия металла с атмосферой. Тем не менее при соединении химически активных металлов (титана, молибдена и др.) такая защита может оказаться недостаточно эффективной, тогда сварку выполняют в защитных газах (например, инертных). Условия разрушения и удаления оксидов при стыковой сварке зависят от значения температуры торцов, величины градиента температур, свойств металлов и их оксидов.

При сварке сопротивлением чем выше температура плавления и твердость оксидов, тем сложнее их удалить. Например: при сварке сталей трудно удалить оксид железа (III)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , сопоставимый по твердости с основным металлом, а оксид железа (II)  $\text{FeO}$ , имеющий относительно низкие температуру плавления и твердость, достаточно легко удаляется. При сварке сопротивлением степень пластической деформации недостаточна для полного разрушения и удаления оксидов. В подавляющем числе случаев с поверхности торцов оксидов удаляется не более 60–70 %, что обуславливает относительно низкую пластичность соединений.

При сварке оплавлением, когда оксиды находятся преимущественно в слое жидкого металла, их твердость не оказывает влияния на их удаление.

Удаление оксидов происходит за счет процессов выброса частиц расплавленного металла из стыка, вытеснения жидкого и твердого металла в грат при осадке. Таким образом, относительно небольшая деформация при стыковой сварке оплавлением обеспечивает практически 100 %-ную очистку поверхности при оптимальном режиме сварки.

На поверхности оплавленных торцов в большинстве случаев имеются микронеровности, поэтому для закрытия зазора  $\Delta_3$  и полного удаления из стыка оксидов требуется определенное время  $\Delta t_1$  (рис. 3.12). Также необходимо учесть интервал времени  $\Delta t_2$  — между началом образования последней перемычки и началом фактической осадки (моментом соприкосновения деталей).

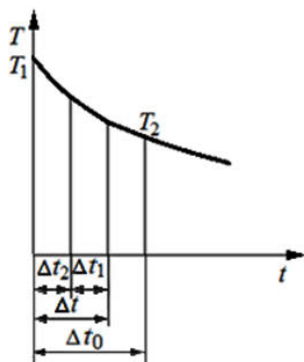


Рис. 3.12. Изменение температуры в стадии осадки

Таким образом, в течение интервала времени  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ , до полного закрытия зазора, может происходить остывание металла (например, на дне кратера).

Интервал времени  $\Delta t_0$ , достаточный для охлаждения металла на торцах от  $T_1$  (средней температуры существования перемычки) до  $T_2$ , будет определяться следующим уравнением:

$$\Delta t_0 = \delta_{\text{ж}} \gamma [c(T_1 - T_2) + m_0] / [\lambda (dT/dx)],$$

где  $\delta_{\text{ж}}$  — толщина слоя расплавленного металла на торцах;  $T_2$  — температура, при которой металл на поверхности торца теряет жидкотекучесть.

Числитель в этом уравнении — это количество теплоты, на которое уменьшается теплосодержание расплавленного слоя единичной площади при охлаждении и кристаллизации, а знаменатель — теплота, отводимая торцами в единицу времени за счет теплопередачи. Таким образом, условием сохранения возможности удаления оксидов из стыка будет  $\Delta t_0 \geq \Delta t$ . На это условие в наибольшей степени влияют теплофизические свойства свариваемых металлов. Например, при сварке алюминиевых сплавов возникают трудности образования сплошного расплавленного слоя  $\delta_{\text{ж}}$  из-за высокой теплопроводности металла. При оплавлении низкоуглеродистой стали, когда толщина расплавленного слоя к концу сварки достигает 0,1–0,3 мм,  $\Delta t_0 = 0,02$ –0,1 с.

Удаление оксидов облегчается при интенсификации процесса оплавления к концу сварки (увеличивается  $\Delta t_0$  за счет увеличения  $\delta_{\text{ж}}$  и снижения  $\Delta t_2$  вследствие увеличения частоты пульсации  $f_{\text{п}}$ ), при увеличении скорости осадки  $v_{\text{ос}}$  (уменьшается  $\Delta t_1$ ) и при задержке отключения сварочного тока при осадке  $t_{\text{ос}}$  (уменьшается  $\Delta t_2$ ). Увеличение  $v_{\text{ос}}$  уменьшает время окисления поверхности торцов в период закрытия зазора.

### 3.6. Дефекты при стыковой сварке

Считается, что при сварке оплавлением при соблюдении оптимальных режимов сварки металл шва по своим свойствам близок к основному металлу. При сварке сопротивлением показатели соединения, особенно пластичность и прочность, часто ниже этих же показателей в основном металле, что связано с неполным удалением оксидных пленок из плоскости стыка. При нарушениях технологического процесса в недопустимых пределах могут возникнуть дефекты.

Основные дефекты при стыковой сварке:

- непровар;
- рыхлоты;
- перегрев;
- трещины;
- искривление волокон и расслоения;

- дефекты структуры;
- прижог поверхности в месте подвода тока.

**Непровар** проявляется в полном или частичном отсутствии металлических связей в соединении. Наиболее частая причина возникновения непровара — неполное удаление оксидных пленок из стыка. Другой причиной является отсутствие образования в процессе сварки общих пограничных зерен. Непровар существенно снижает прочность и пластичность соединений. Характер оксидных включений оказывает большое влияние на пластичность металла шва. На изломе они проявляются в виде матовых пятен. В углеродистых сталях растекание в плоскости стыка оксидов железа, обладающих относительно невысокой температурой плавления, вызывает разрушение при значительно меньших углах изгиба, чем обычно, что связано с образованием пленок, практически не имеющих разрывов. Образование тугоплавких оксидов при сварке легированных сталей и сплавов, которые, в момент осадки находясь в твердом состоянии, остались в плоскости стыка, также снижают пластичность и прочность металла шва.

Причина непровара при отсутствии оксидов — недостаточный нагрев торцов. В изломах таких холодных стыков наблюдается хрупкое межзеренное разрушение. Технологические причины возникновения непровара: неустойчивое оплавление, раннее выключение тока (до начала осадки), недостаточная величина оплавления, малая скорость осадки. Кристаллизация не вытесненного из стыка литого металла (в результате недостаточной осадки) сопровождается образованием усадочных рыхлот.

Параметры режима при сварке оплавлением должны быть такими, чтобы обеспечить отсутствие глубоких кратеров, с одной стороны, и оптимальную толщину слоя расплавленного металла — с другой.

**Рыхлоты** обычно образуются в глубоких кратерах, в местах, заполненных расплавленным металлом. Кристаллизация металла сопровождается появлением усадочных дефектов — раковин в форме линз. При недостаточной осадке раковины могут возникать и в околошовной зоне на участке твердого состояния металла.

**Перегрев** металла обычно вызывает укрупнение зерна в околошовной зоне и снижение пластичности соединения. Сильный перегрев может привести к пережогу. Причины дефекта: слишком затянутый цикл оплавления, излишний подогрев деталей перед оплавлением, малая величина осадки, слишком большая длительность осадки под током.

**Трещины** при стыковой сварке могут быть двух видов: продольные и поперечные (кольцевые). Продольные трещины образуются при излишней осадке металла. Это возникает при перегреве места сварки. Кольцевые трещины обычно возникают при сварке закаливающихся материалов на слишком жестком режиме. Их образованию способствует упругая деформация деталей в зажимах вследствие отхода назад подвижной плиты машины.

К таким дефектам относят и **расслоение** — дефект металла, который раскрывается при осадке и имеет вид трещины.

**Искривление волокон** в области стыка обычно наблюдается при чрезмерной осадке металлов с резко выраженной анизотропией свойств. Это приводит к ухудшению работоспособности соединения.

К **дефектам структуры** обычно относят образование крупного зерна, повышенное содержание неметаллических включений в стыке, снижение содержания легирующих компонентов в стыке. Образование крупного зерна связано с перегревом металла (см. выше). Повышенное содержание неметаллических включений связано с интенсивным окислением металла при сварке или, в некоторых случаях, с повышенным их содержанием в основном металле. Обеднение металла шва легирующими компонентами обусловлено следующими причинами: выгоранием (окислением), испарением и вытеснением из стыка металла, находящегося в жидком или твердожидком состоянии.

**Прижог поверхности детали** образуется в месте подвода тока при плохой подготовке поверхности детали, недостаточном усилии зажатия или неправильной установке губок (электродов). Большое выделение теплоты в этом месте приводит к подплавлению поверхности. Если свариваемый металл подвержен закалке, то в месте прижога возможно существенное повышение твердости, что осложняет последующую механическую обработку детали.

Для стыковой сварки также устанавливаются количество и размеры допустимых дефектов.

## 4. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

---

Высокое качество сварных изделий обеспечивается совокупностью всех конструктивных и технологических решений. Обязательное требование современного производства — тщательная проработка конструкции изделия на технологичность. При проектировании сварной конструкции должны учитываться все особенности технологического процесса изготовления изделия, обеспечивающие необходимые технологические и эксплуатационные характеристики. Технологический процесс разрабатывается на основе конструкторской документации, в которой указывается материал, форма, размеры, тип соединения и технические условия на изготовление изделия, с учетом программы выпуска изделий и технологических возможностей оборудования. Разработка технологического процесса подразумевает выбор оборудования, режима сварки, рациональные способы подготовки поверхности, сборки, сварки узла, а также мероприятий, обеспечивающих межоперационный контроль качества.

### 4.1. Технологическое конструирование сварных соединений

---

На этапе проектирования сварной конструкции при выборе материала наряду с эксплуатационными характеристиками необходимо учитывать технологические свойства: обрабатываемость давлением, свариваемость и др., оказывающие непосредственное влияние на качество и экономичность сварного узла.

При разработке конструкции изделия важно обеспечить по возможности наиболее удобный подход электродов к месту сварки, чтобы детали могли быть сварены на типовом оборудовании прямыми электродами. При большом разнообразии форм, размеров узлов для точечной, шовной и рельефной сварки (от простых плоских панелей до сложных пространственных конструкций) выделяют три основных типа узлов:

- узлы открытого типа, которые наиболее технологичны, так как обеспечивают свободный подход электродов с двух сторон (рис. 4.1, *а*);
- узлы полужакрытого типа, обладающие худшей технологичностью; у них ограничен доступ одного из электродов (рис. 4.1, *б*);
- узлы закрытого типа с ограниченным доступом электродов с двух сторон; они наименее технологичны — это узлы коробчатой формы с внутренними швами, закрытые панели малой высоты и т. п. (рис. 4.1, *в*).

Большинство изделий, получаемых точечной и шовной сваркой, обычно изготавливают из листов и профилей. Выбор способа сварки обусловлен толщиной и материалом деталей, конструкцией узла, требованиями к качеству соединений, характером конкретного производства.

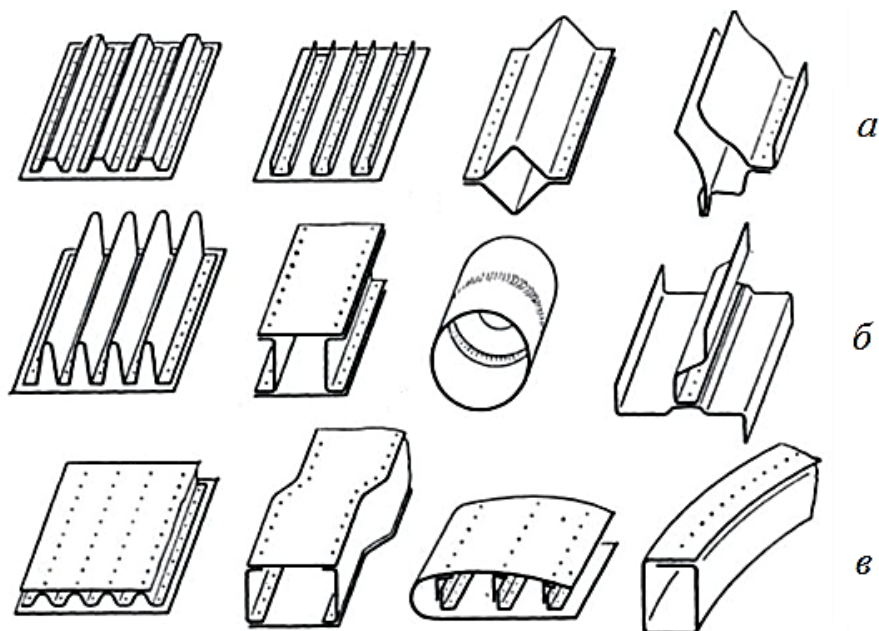


Рис. 4.1. Варианты конструкции узлов, выполняемых точечной и шовной сваркой

Наиболее часто точечную сварку применяют в тех случаях, когда герметичность не требуется. Прочноплотные соединения выполняют шовной сваркой. При изготовлении емкости внутренние ребра выбирают тоньше обшивки для предупреждения разгерметизации при случайном разрушении точки.

Обычно точечной и шовной сваркой соединяют детали толщиной 0,5–6 мм. В некоторых случаях верхний предел доходит до 30 мм, а в микросварке нижний предел может опускаться до 2 мкм. Свариваются детали как одной толщины, так и разной. Соотношение толщин свариваемых деталей при точечной и шовной сварке — до 1:5, при микросварке — до 1:100 и более.

Контактной сваркой соединяют детали из одноименного и разноименного материала (особенно в микросварке).

Обычно применяют двустороннюю сварку. В тех случаях, когда доступ с одной стороны ограничен, — одностороннюю. В целях повышения производительности и снижения коробления изделий предпочтительно использовать многоточечную сварку.

Применение рельефной сварки позволяет увеличить производительность (одновременная постановка группы точек, соединение по всему контуру), уменьшить величину нахлестки и массу узлов (из-за ограничения области разогрева и пластической деформации), повысить стойкость электродов (вследствие увеличения размеров их рабочей поверхности), устранить разметку.



Большое распространение получила рельефная сварка с формированием рельефа за счет сопряжения различных по форме деталей: острой грани гайки или штуцера с листом (контурная сварка, рис. 4.2, *а* и *б*), двух труб (Т-образная сварка, рис. 4.2, *в*), винта, проволоки с листом (рис. 4.2, *г* и *д*). Иногда рельефы изготавливают отдельно в виде колец, шайб, шариков.

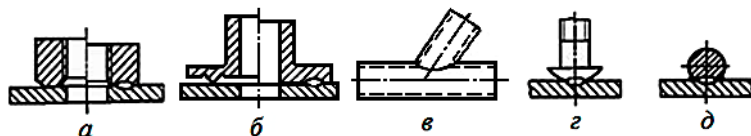


Рис. 4.2. Примеры узлов, выполненных рельефной сваркой

#### 4.1.1. Конструктивные элементы соединений

Конструктивные элементы соединения (рис. 4.3) оговорены ГОСТ 15878–79 для соединений двух групп — А и Б. Группу устанавливают при проектировании узла в зависимости от требований, предъявляемых к сварной конструкции, и от особенностей технологического процесса. Соединения группы А имеют более высокие прочностные характеристики.

Основными конструктивными элементами являются расчетный (минимальный) диаметр ядра (для точечной) и ширина литой зоны (для шовной сварки). Их измеряют в плоскости сопряжения деталей и обозначают  $d$  для обоих случаев сварки. Эти размеры устанавливают из условия получения необходимой и стабильной прочности, герметичности шва при минимальной нахлестке. Максимальные размеры ядра ограничивают из-за возможности появления различных дефектов, снижения стойкости электродов, устанавливая верхние пределы на 15–25 % больше минимально допустимых (при  $s \geq 0,5$  мм). Приблизительно при толщине деталей  $s \geq 0,5$  мм минимальный диаметр литого ядра для соединений группы А можно определить по эмпирической формуле

$$d = 2s + (2-3) \text{ мм.}$$

Более точные его значения, учитывающие уменьшение отношения  $d/s$  с ростом толщины, описываются формулой

$$d = 4s^{2/3}.$$

Другие конструктивные элементы соединений:

$h$  — величина проплавления;

$g$  — глубина вмятины от электрода;

$t_w$  — расстояние между центрами соседних точек в ряду (шаг);

$f$  — величина перекрытия литых зон (при шовной сварке);

$B$  — минимальная величина нахлестки;

$u$  — расстояние от центра точки до края нахлестки;

$c$  — расстояние между осями соседних рядов точек и др.

Величина проплавления  $h$  ( $h_1$ ) в большинстве случаев должна находиться в пределах 20–80 % толщины детали. Ее измеряют отдельно для каждой детали. Минимальные значения соответствуют проплавлению тонкой детали при сварке деталей неравной толщины. На титановых сплавах верхний предел увеличивают до 95 %, а на магниевых — уменьшают до 70 %.

Глубина вмятины  $g$  ( $g_1$ ) не должна превышать 20 % толщины детали, однако при сварке деталей неравной толщины и в труднодоступных местах она может достигать 30 %. При микросварке глубина обычно не превышает нескольких процентов. Глубокие вмятины ухудшают внешний вид и в большинстве случаев уменьшают прочность точек.

Шаг  $t$  — минимальное расстояние между центрами соседних точек в ряду — устанавливают из условия незначительного шунтирования тока при сохранении высокой прочности шва.

Величина перекрытия литых зон герметичного шва  $f$  должна составлять не менее 25 % длины литой зоны (рис. 4.3).

Минимальная величина нахлестки  $B$  — это наименьшая ширина сопрягаемой части соединяемых деталей без радиуса закругления соседних элементов (стенки, полки). При  $r \ll 2s$  в нахлестку включают не только радиус, но и толщину стенки (рис. 4.3).

Расстояние от центра точки или оси шва до края нахлестки  $u$  должно быть не менее 0,5  $B$ .

Расстояние между осями соседних рядов  $s$  выбирают на 20 % большим, чем  $t_{ш}$ .

Абсолютные размеры конструктивных элементов возрастают с увеличением толщины деталей. Некоторые из них ( $B$ ,  $h$ ) зависят и от материала; размеры  $t_{ш}$ ,  $u$ ,  $s$  также косвенно связаны с материалом деталей, так как из конструктивных соображений при изменении  $B$  меняют и эти величины. Например, при сварке легированных сталей несколько уменьшают  $t_{ш}$ , однако это не связано с меньшим шунтированием тока через соседнюю точку. Действительно, при уменьшении электропроводимости возрастает как сопротивление шунтирующей цепи, так и сопротивление зоны сварки. Условия шунтирования остаются практически постоянными. Величины  $B$ ,  $t_{ш}$ ,  $u$ ,  $s$ , кроме того, зависят от соотношения толщины свариваемых деталей: при  $s/s_1 > 2$  их увеличивают на 20–30 %. При сварке деталей неравной толщины конструктивные элементы необходимо выбирать по более тонкой детали.

В микросварке в связи с малой толщиной деталей и спецификой ее технологических процессов абсолютные размеры и соотношения конструктивных элементов отличаются от приведенных выше.

Высокий современный технический уровень машин и надежность аппаратуры позволяют в ряде случаев (при  $s < 3$  мм) уменьшать  $d$  (на 22–33 %) и получать соединения, которые относят к группе Б.

Для сохранения высокой прочности узла увеличивают число точек в ряду, уменьшая  $t_{\text{ш}}$ . Увеличение числа точек обеспечивает более равномерное распределение нагрузки на них при эксплуатации с меньшей концентрацией напряжений; замедляется развитие усталостных трещин, они несколько локализуются. При уменьшении  $B$  снижается масса соединений, но возрастают требования к точности изготовления деталей, сборке, подготовке поверхности, стабильности работы машин.

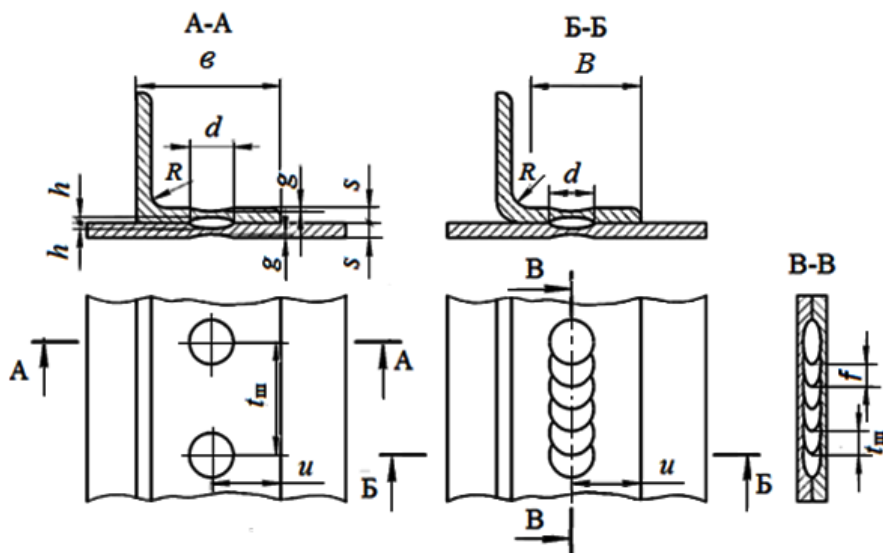


Рис. 4.3. Конструктивные элементы соединения

Подготовка деталей к стыковой сварке заключается в получении определенной формы торцов, очистке их поверхности и поверхности деталей, правильной установке торцов перед началом сварки. Торцы деталей получают механической резкой на ножницах, пилах, металлорежущих станках, горячей или холодной высадкой на прессах, а также с помощью плазменной и кислородной резки с последующим удалением шлака.

Токоподводящие участки деталей и торцов очищают различными механическими способами и травлением.

При сварке сопротивлением (вследствие трудности обновления поверхности) требуется более тщательная установка деталей при сборке, чем при сварке оплавлением. Так, зазор между торцами при сварке сопротивлением не допускается более 0,5 мм. При сварке оплавлением он может быть большим (до 15 %  $\Delta_{\text{опл}}$ ). При сварке «развитых» сечений требования к качеству сборки, в частности к взаимной параллельности торцевых поверхностей деталей, ужесточаются. Торцы деталей, подлежащие стыковой сварке, должны быть рационально сконструированы:

- необходимо создать условия для равномерного нагрева и по возможности одинаковой пластической деформации при осадке;
- обеспечить защиту торцов от окисления и облегчить вытеснение окисленного металла из рабочей зоны шва (особенно при сварке сопротивлением);
- форма деталей должна обеспечить надежное закрепление их в зажимах сварочной машины и токоподвод вблизи зоны сварки. Форму и размеры сечения торцов заготовок следует выполнять примерно одинаковыми. Различие в диаметрах не должно превышать 15 %, а по толщине — 10 %.

#### 4.2. Основные операции типового технологического процесса производства сварных узлов

---

Точечной и шовной сваркой обычно соединяют детали в узлы (секции), затем их собирают между собой. Такое поэтапное производство позволяет эффективно использовать высокопроизводительные способы сборки и сварки, повышать уровень механизации и автоматизации, тем самым улучшать качество соединений, снижать себестоимость продукции.

Разработку технологического процесса начинают уже на этапах проектирования новой конструкции созданием базовой технологии. В дальнейшем разрабатывается рабочий технологический процесс (маршрутные карты, операционные карты, операционные эскизы и прочая технологическая документация в соответствии с требованиями стандартов).

Типовой технологический процесс производства сварных узлов состоит из ряда основных операций, выполняемых в определенной последовательности:

- изготовление деталей;
- подготовка свариваемых поверхностей;
- сборка и прихватка, затем сварка;
- правка и механическая обработка;
- антикоррозионная защита;
- контроль (может выполняться в процессе изготовления несколько раз, на различных этапах).

Набор, количество и последовательность операций может варьироваться в зависимости от масштаба производства, степени взаимозаменяемости деталей, их технологических характеристик, ответственности узлов, степени механизации и автоматизации производства, применяемого оборудования, а также других особенностей производства.

### 4.2.1. Изготовление деталей

Качество изготавливаемых деталей во многом определяет трудоемкость и качество сборки и сварки. В результате низкой точности изготовления деталей при сборке они плохо сопрягаются, возникают увеличенные зазоры, перекосы и т. д.

Современное производство располагает широким спектром технологических способов раскроя листовых заготовок — это резка на гильотинных, дисковых, вибрационных ножницах, в штампах, резка кислородной и плазменной струей, водоабразивная резка, лазерный раскрой и т. д. Значительная часть современного оборудования имеет высокую степень автоматизации и оснащена числовым программным управлением. На подобном оборудовании осуществляют и раскрой профиля.

Формообразование деталей обычно выполняют холодной деформацией: гибкой во вращающихся валках, свободной гибкой, обтяжкой, вытяжкой, выдавливанием, штамповкой. В зависимости от пластических свойств материала в ряде случаев применяют подогрев заготовок. Особо крупные тонкостенные детали (днища, оболочки) изготавливают высокоскоростной обработкой, например взрывом.

### 4.2.2. Подготовка поверхности

Цель этой операции — удаление исходных толстых, неравномерных по свойствам поверхностных пленок. В результате повторного окисления возникают новые, тонкие с малым и стабильным контактным сопротивлением, пленки.

Способы подготовки поверхности разнообразны. В наиболее полном виде они включают несколько последовательных операций:

- обезжиривание;
- удаление исходных, в основном оксидных, пленок;
- пассивирование;
- нейтрализацию;
- промывку;
- сушку;
- контроль.

**Обезжиривание** служит для удаления загрязнений, масла, маскировочной краски протиркой растворителями либо в ваннах различного состава: содовых растворах (для легированных сталей и титановых сплавов), щелочных растворах (для алюминиевых и магниевых сплавов). В целях ускорения процесса в ванну иногда вводят ультразвуковые колебания. В автомобильной промышленности холоднокатаную сталь сваривают часто вообще без подготовки поверхности (тонкий слой масла мало влия-

ет на формирование точек), латуни — после обезжиривания. Например, химическое обезжиривание может быть реализовано в растворе следующего состава:

- тринатрийфосфат — 60–70 г/дм<sup>3</sup>;
- вещество вспомогательное ОП-7 или ОП-10—3—5 г/дм<sup>3</sup>.

Режим обработки:

- температура раствора — 70–80 °С;
- время выдержки — 10–20 мин.

**Удаление оксидных пленок** — трудоемкая операция, так как оксиды химически связаны с металлом. Обычно их удаляют механической обработкой или химическим травлением.

**Механическую подготовку** проводят дробеструйной обработкой, абразивной зачисткой — вращающимися наждачными кругами или металлическими щетками.

Дробеструйную обработку применяют главным образом для стальных деталей с толстой оксидной пленкой (после термообработки, горячей деформации и т. д.) или с особыми поверхностными слоями, для титановых сплавов с окалиной  $TiO_2$ , реже — для других металлов. Дробь изготавливают в виде частиц отбеленного чугуна, мелконарезанной стальной проволоки, а для алюминиевых сплавов — в виде стеклянных шариков.

Зачистку вращающимися щетками или абразивными кругами используют для деталей из любых металлов, но чаще из сталей (в том числе жаропрочных, высокопрочных) при малых масштабах производства.

Иногда механическую обработку применяют для алюминиевых и магниевых сплавов. Во избежание глубокого повреждения металла ограничивают силу прижатия вращающихся щеток, лимитируют диаметр и длину проволочек (не более 0,2 и не менее 40 мм соответственно). Такая зачистка поверхности активизирует повторное окисление, поэтому в зависимости от условий хранения детали из алюминиевых и магниевых сплавов должны быть сварены не позднее чем через 5–20 ч после обработки.

**Химическое или электрохимическое травление** находит широкое применение как в единичном, так и массовом производстве практически для любых металлов. После такой обработки возникает более равномерная и менее активная пленка. Появляется возможность управлять ее свойствами и скоростью последующего роста.

Химическое травление осуществляют в щелочных и кислотных растворах с различными добавками для регулирования скорости травления, улучшения взаимодействия с поверхностью деталей, пассивирования поверхности (табл. 4.1). Наиболее тщательно обрабатывают поверхность алюминиевых и магниевых сплавов при производстве летательных аппаратов.

Таблица 4.1

Составы для химического травления (г/л) черных металлов:  
1–3 — углеродистой стали и чугуна, 4–5 — легированной стали

Состав	1	2	3	4	5
Серная кислота (плотность 1,84)	150–200	70–100	100–150	400–450	—
Соляная кислота (плотность 1,19)	—	100–150	—	250–300	350–380
Азотная кислота (плотность 1,38)	—	—	—	—	80–90
Хлорид натрия	—	—	75–100	—	—
Присадка (ката- пин, ингибитор БА-6, уротропин)	3–5	4–6	3–5	3–5	—

Для алюминиевых сплавов используют растворы ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$  с добавками калиевого  $K_2Cr_2O_7$  или натриевого  $Na_2Cr_2O_7$  хромпика. Ортофосфорная кислота почти не взаимодействует с алюминием, но активно растворяет поверхностные оксиды. Если необходимо глубокое травление (например, снятие лакирующего слоя на сплаве АМг6), обработку ведут в горячем щелочном растворе (состав № 1, табл. 4.2). Однако поверхность активизируется, и за короткое время (одни сутки) вновь возникает достаточно толстая оксидная пленка.

Таблица 4.2

Составы для химического травления алюминиевых сплавов

Номер раствора	Состав травильного раствора, г/л				Температура, °С	Время травления, мин
	NaOH	$Cr_2O_3$	NaF	$H_2SO_4$		
1	50	—	40	—	70–80	0,5–1
2	—	30	—	0,5–1,0	70	1–1,5

Алюминиевые и магниевые сплавы требуют дополнительной химической обработки для уплотнения и стабилизации новой оксидной пленки — ее пассивирования. Детали из алюминиевых сплавов пассивируют одновременно с травлением, вводя в травящий раствор хромпик. Магниевые сплавы пассивируют после травления, обрабатывая в растворе хромового ангидрида ( $Cr_2O_3$ ).

Для некоторых деталей, в основном ответственного назначения из коррозионно-стойких и жаропрочных легированных сталей и сплавов, тугоплавких металлов и медных сплавов, иногда применяют электролитическое травление и полирование. Примеры составов для электрохимического травления углеродистых и легированных сталей приведены в табл. 4.3.

После химического или электролитического травления в большинстве случаев необходима **нейтрализация**, т. е. удаление с поверхности продуктов реакции или электролита. Эту операцию называют также осветлением поверхности. Применяют различные растворы для нейтрализации (табл. 4.4).

Таблица 4.3

Режимы электрохимического (анодного) травления

Металлы и сплавы	Состав травильного раствора			Плотность тока, кА/м <sup>2</sup>	Температура, °С	Время травления, мин
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl	NaCl			
Углеродистые сплавы	50–60	25–30	15–20	0,7–1	60–70	10–15
Легированные стали	50–60	30–40	20–30	0,5–1,0	20–40	30

Между операциями химической обработки детали промывают обычно в горячей, а затем в холодной воде с водородным показателем pH = 6,5–7,5. Особо ответственные узлы окончательно промывают опресненной водой. Детали сушат горячим воздухом или в сушильных шкафах.

**Обезжиривание, химическую обработку, промывку, сушку** ведут в изолированном помещении с усиленной приточно-вытяжной вентиляцией и бортовыми отсосами у ванны. Детали транспортируют, загружают и вынимают механическими транспортными устройствами с подъемниками, часто автоматизированными, которые называют автооператором. При большом масштабе производства подготовку поверхности проводят в специальных автоматизированных машинах струйным методом.

Таблица 4.4

Составы растворов для снятия травильного шлама (осветления)

Компонент раствора	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжительность, мин	Обрабатываемая сталь
Азотная кислота	70—80	15—30	До 0,8	Углеродистая
Серная кислота	80—100		5—10	Средне- и низколегированная
Серная кислота	15—30			
Хромовый ангидрид	70—120			
Хлористый натрий	3—5		Коррозионно-стойкая	
Фтористоводородная кислота	4—5			
Азотная кислота	350—400		1—20	Любая
Едкий натр*	50—100	60—80	1—3	

\* Для анодного снятия шлама при плотности тока 5–10 А/дм<sup>2</sup> с использованием стальных катодов.



Качество подготовки поверхности оценивают визуально сравнением с эталонными образцами и измерением электрического сопротивления двух сжатых образцов. Электросопротивление измеряют микроомметром или другими приборами на установках типа машины для точечной сварки с изоляцией одного из электродов. Усилие сжатия и размеры рабочей поверхности электродов выбирают, как при точечной сварке, в зависимости от толщины и материала деталей.

Для сталей и титановых сплавов достаточно визуального контроля: поверхность деталей должна быть матовой или иметь равномерный металлический блеск. Однако в спорных случаях измеряют электросопротивление. Для деталей из алюминиевого сплава визуального контроля недостаточно и в обязательном порядке измеряют электросопротивление  $r_{\Sigma}$ . Сразу после обработки деталей из сплавов Д16Т, В95Т, АМг6  $r_{\Sigma}$  не превышает 40–60 мкОм, а деталей из сплавов АМг, АМц, САП, АБМ, ВКА-1–30–40 мкОм. В течение 4–5 суток  $r_{\Sigma}$  медленно повышается до 100–120 мкОм. Без пассивирования  $r_{\Sigma}$  растет в 4–5 раз быстрее. Магниевые сплавы после пассивирования сохраняют низкое значение  $r_{\Sigma}$  в течение 8–10 суток.

#### 4.2.3. Сборка

Сборка должна обеспечивать точное взаимное расположение деталей (в соответствии с чертежом) и минимальные зазоры между ними. Качество и трудоемкость сборки зависят от точности изготовления деталей, степени их взаимозаменяемости, а также механизации процесса.

При отсутствии взаимозаменяемости детали подгоняют. Эта сложная и трудоемкая операция выполняется рабочим высокой квалификации. Поверхность деталей неизбежно загрязняется. Поэтому вначале требуется предварительная сборка узла с подгонкой. Затем узел разбирают, подготавливают поверхность, после чего выполняют окончательную сборку. На последнем этапе никакие подгоночные операции не допускают.

Минимальные зазоры — важнейшее условие высокого качества соединений. При сварке с большими зазорами и в особенности деталей с повышенной жесткостью часть сварочного усилия тратится на устранение этих зазоров. Площадь контакта электрод–деталь и фактическое сварочное усилие уменьшаются. Плотность тока под электродами снижается, а в контакте между деталями возрастает. Одновременно усиливается склонность к выплескам и непровару.

Допускаемые сборочные зазоры зависят от способа сварки, жесткости узла (толщины и формы деталей), а также от длины участка с этими зазорами. Чем жестче деталь и короче участок, тем меньше допускаемые зазоры. Например, при точечной сварке деталей из сталей толщиной 1 мм зазоры должны быть не более 0,4 мм на длине 100 мм и не более 1,2 мм на длине 300 мм. Для толщины 3 мм эти значения уменьшаются соответственно до 0,3 и 0,9 мм.

Сборку выполняют:

- по разметке;
- по эталонному узлу;
- с применением шаблонов;
- по сборочным отверстиям;
- в специализированных приспособлениях.

Механизация и использование приспособлений повышают производительность сборки и ее качество.

По окончании сборки размечают места прихватки и сварки. Способы разметки различны: карандашом с помощью шаблонов или мерительного инструмента, приклеиванием рядом с нахлесткой заранее размеченной (типографским способом) липкой бумажной ленты. Эффективны оптические или механические разметчики на точечной машине, обеспечивающие заданное расстояние между точками. Часто сваривают и без разметки.

Качество сборки оценивают, контролируя основные размеры узла, точное взаимное расположение деталей и зазоры. Зазоры можно измерять автоматически специальным прибором в процессе прихватки или сварки.

#### 4.2.4. Прихватка

Прихватку выполняют:

- для точной фиксации деталей в узле;
- предотвращения смещения деталей в процессе сварки;
- снижения остаточных деформаций;
- уменьшения зазоров;
- повышения жесткости узла.

Собранные узлы прихватывают:

- точечной сваркой на стационарных машинах;
- тонколистовые детали сложной формы и больших размеров — в приспособлениях (стапелях) с помощью передвижных контактных машин (клещей, пистолетов) или аргонодуговой сваркой;
- крупные толстостенные узлы — аргонодуговой, ручной дуговой сваркой, часто с последующим удалением мест прихватки.

Шаг прихватки зависит от марки сплава, толщины деталей, жесткости узла, зазоров и вида сварки. Чем меньше зазоры и больше жесткость узла, тем больше может быть шаг. Для точечной сварки шаг прихваточных точек обычно составляет 100–300 мм, для шовной — в 3–5 раз меньше (во избежание сильного коробления и «набегания» металла).

Под точечную сварку детали прихватывают по линии шва, режим прихватки устанавливают аналогичным сварочному. Под шовную сварку прихваточные точки располагают либо по оси шва, либо рядом, а их диаметр устанавливают меньше ширины шва (до  $2,5s$ ).

Рациональная последовательность прихватки позволяет уменьшить сварочные деформации. Протяженные швы рекомендуется прихватывать от центра к краям попеременно (рис. 4.4), начиная с участков повышенной жесткости. Обечайки для более равномерного распределения сборочных зазоров прихватывают попеременно точками, расположенными диаметрально противоположно. Если зазоры оказываются большими, то обечайки из высокопрочных сплавов можно прокатать стальными роликами.

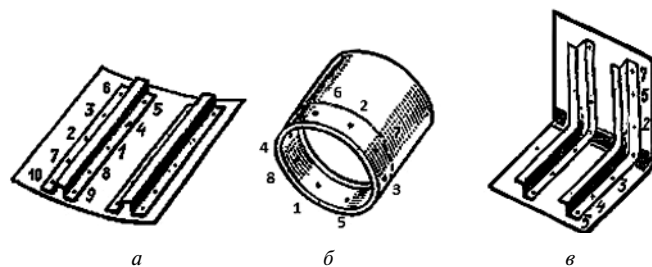


Рис. 4.4. Рациональная последовательность сварки (прихватки): *а* — панели; *б* — обечайки; *в* — элемента коробчатой формы

Простые узлы, жестко зафиксированные в сборочно-сварочных приспособлениях, обычно сваривают без прихватки в этих же приспособлениях. Часто она оказывается излишней при многоточечной сварке.

При контроле качества прихваток обычно проверяют следующие параметры: зазоры между деталями, общие размеры узла.

#### 4.2.5. Форма и размеры рабочей поверхности электродов и роликов

Форма и величина рабочей (контактной) поверхности — параметры, существенно влияющие на размеры и стабильность литого ядра, определяющие выбор остальных параметров режима. Форма рабочей поверхности должна соответствовать конфигурации наружной поверхности деталей.

Температура в контакте электрод—деталь — наиболее важная характеристика условий работы электродов. Она зависит от выделения теплоты и интенсивности теплообмена. Теплота выделяется в электроде и контакте электрод—деталь в зоне нагрева детали. Теплообмен зависит от интенсивности охлаждения электрода и теплопроводности его материала.

Температура контактной поверхности электрода изменяется в пределах 200 °С и более, достигая максимума в момент выключения импульса тока и снижаясь во время паузы. Разность температуры нагрева электродов зависит от многих факторов: способа сварки, режима, темпа сварки, материала электрода, состояния поверхности детали, интенсивности охлаждения и др. В контакте электрод—деталь на рабочей поверхности электродов возможно повышение температуры до 750 °С при точечной сварке сталей и до 400 °С при сварке легких сплавов, а давление при проковке может достигать 400 МПа. Важнейшая характеристика электродов — их стойкость, т. е. способ-

ность сохранять исходную форму, размеры и свойства рабочей поверхности.

**Электроды** для различных способов сварки оценивают по стойкости неодинаково. Например, стойкость электродов для точечной сварки чаще всего оценивают по числу точек до увеличения рабочей поверхности на 20 %. При точечной сварке легких сплавов и плакированных сталей стойкость определяют по числу точек до зачистки рабочей поверхности, которая при сварке этих материалов загрязняется значительно быстрее, чем при сварке сталей.

Стойкость электродов для шовной сварки также оценивают по увеличению рабочей поверхности. При рельефной сварке стойкость электродов определяют по образованию углубления в одном из электродов под местом сварки.

Необходимость зачистки электродов при сварке легких сплавов можно установить по скорости нарастания напряжения в начале сварочного импульса. Эта скорость значительно увеличивается при сварке электродами, рабочая поверхность которых окислена или загрязнена.

Электроды контактных машин изготавливают из специальных сплавов на медной основе. Они имеют низкое электросопротивление, высокую теплопроводность и жаропрочность, значительную горячую твердость и малую склонность к взаимодействию с металлом детали.

Чистая электрическая медь в нагартованном состоянии — наиболее электропроводный материал, иногда его применяют для изготовления электродов. Но вследствие низкой температуры рекристаллизации (200 °С) медь быстро разупрочняется, и стойкость таких электродов снижается.

Обычно медь легируют кадмием, хромом, кобальтом, бериллием и другими элементами. Общее количество легирующих компонентов не превышает 2,5 %. Жаропрочность таких материалов повышают дисперсионным твердением и блокировкой границ зерен тугоплавкой фазой, которая слабо взаимодействует с основой при нагреве. Эти сплавы при изготовлении подвергаются холодной деформации, термической или термомеханической обработке, что увеличивает их прочность и жаропрочность.

В табл. 4.5 приведены технические характеристики различных сплавов, применяемых для изготовления электродов контактных машин, получивших распространение в промышленности.

Материалы с низким электросопротивлением (холоднотянутую медь и БрКд1) применяют для сварки легких сплавов.

Для сварки сталей и титановых сплавов целесообразно использовать менее электропроводимые, но более твердые бронзы (сплавы меди с хромом и никелем и с различными легирующими добавками) типа БрХ, БрХЦр, БрНБТ и др. Материалы этой группы принадлежат к дисперсионно-твердеющим сплавам. Они подвергаются термомеханической обработке (закалке, холодной деформации и отпуску). Первые две марки, обладающие относительно низким электросопротивлением, применяют для сварки сталей и титана. Бронзу БрНБТ используют для сварки жаропрочных и нике-

левых сплавов и сталей, которые свариваются при высоких давлениях и малых плотностях тока.

Особую группу представляют композитные материалы, изготавливаемые методами порошковой металлургии или пропиткой медью остова, состоящего из тугоплавкого материала.

Таблица 4.5

Характеристика сплавов на основе меди для изготовления электродов контактных машин

Сплав, содержание легирующих элементов	Электропроводность при 20 °С, %	Твердость НВ при 20 °С	Временное сопротивление, МПа	Температура начала рекристаллизации, °С	Область применения электродов
1	2	3	4	5	6
Медь М1, мягкая (прутки)	100	50	200	—	—
Медь М1, холоднотянутая (прутки)	98	80–100	270	200	Точечная и шовная сварка легких сплавов
Кадмиевая бронза БрКд1 (МК)» 0,9–1,2 % Cd	85–90	95–115	400–450	350	То же
Хромовая бронза БрХ; 0,4–0,7 % Cr	82–85	120–140	400–450	400	Точечная сварка углеродистых, низколегированных сталей
Хромоциркониевая бронза БрХЦр; 0,4–0,7 % Cr, 0,03–0,06 % Zr	80–82	140–160	400–450	500	Точечная и шовная сварка углеродистых, низколегированных сталей и титана
Никель-бериллиевая бронза БрНБТ; 1,4–1,6 % Ni, 0,2–0,4 % Be, 0,05–0,15 % Ti	50	180–240	850	500	Точечная и шовная сварка коррозионно-стойких сталей, титана. Электроды для рельефной и стыковой сварки

Окончание табл. 4.5

1	2	3	4	5	6
Никель-кремниевая бронза БрНК; 1,2–2,3 % Ni, 0,3–0,8 % Si	40	До 200	800	450	Консоли точечных и шовных машин. Электроды для рельефной и стыковой сварки
Кобальт-бериллиевая бронза БрКБ; 2,3–2,7 % Co, 0,4–0,7 % Be	50	180–230	780	500	Электроды для рельефной и стыковой сварки
Никель-кремниевая бронза БрНХК; 0,4–1 % Cr, 2,2–2, в % (Ni+Co), 0,5–0,9 % Si	50	200–240	800	500	То же

Для изготовления вставок электродов для рельефной и стыковой сварки применяют кирит — порошковую композицию, состоящую из 55–80 % W и 20–45 % Cu. Тугоплавкие частицы вольфрама соединяются электропроводной связкой из меди.

Конструкция электродов обусловлена способом контактной сварки, конфигурацией изделий в месте соединения и толщиной деталей. Электроды для точечной сварки имеют разнообразную конструкцию (рис. 4.5).

Наиболее распространены прямые (цилиндрические) электроды простейшей конструкции (рис. 4.5, а). Их изготавливают из прутка диаметром 12, 16, 20, 25, 32 и 40 мм (ГОСТ 14111–77). Эти электроды более технологичны при производстве (изготавливают холодной штамповкой), а охлаждающий канал близко подходит к рабочей поверхности. Рабочая поверхность электродов может быть плоской, в форме усеченного конуса или сферической. Электроды с поверхностью плоской формы используют при сварке сталей. Диаметр рабочей поверхности выбирают близким к номинальному диаметру литого ядра. Угол  $\alpha$  при вершине конуса должен быть  $120^\circ$ . При уменьшении угла снижается стойкость электродов вследствие интенсивного смятия рабочей поверхности. При увеличении угла усиливается колебание диаметра рабочей поверхности даже при незначительных деформациях. Плоская рабочая поверхность может быть несимметричной относительно оси электрода. Электроды с поверхностью сферической формы применяют при сварке легких сплавов. При этом теплота из зоны сварки лучше отводится в электроды, уменьшается склонность к образованию наружных выплесков, стабилизируются условия сварки при небольших наклонах конструкции, повыша-

ется стойкость электродов. Поддержание сферической формы поверхности электродов при эксплуатации усложняется. Радиус сферы (6–250 мм) увеличивается с увеличением толщины металла и зависит от жесткости режима. При более жестких режимах увеличивают радиус сферы для уменьшения опасности выплеска.

Прямые электроды используют различной длины. В целях экономии материала на многоэлектродных машинах целесообразно применять короткие электроды (рис. 4.5, б). Прямые электроды изготавливают с развитой рабочей частью (рис. 4.5 г), если они предназначены только для подвода тока к одной из деталей, а концентрация сварочного тока обеспечивается вторым электродом с рабочей поверхностью нормальных размеров (см. рис. 4.5, а).

Сечение в местах расположения охлаждающих каналов подбирают из расчета допустимой плотности тока  $50 \text{ А/мм}^2$ . В сплошном сечении эта плотность составляет до  $30 \text{ А/мм}^2$ .

Для сварки деталей сложной конструкции используют электроды со смещенной рабочей поверхностью (рис. 4.5, в). Эти электроды хуже охлаждаются вследствие большего удаления охлаждающего канала от рабочей поверхности и имеют меньшую стойкость.

Технология изготовления таких электродов более сложная по сравнению со стандартными, поэтому выше стоимость их производства. Аналогичное назначение имеют и горизонтальные электроды.

Электрод крепится хвостовиком, который обычно имеет форму усеченного конуса, что обеспечивает надежный электрический контакт, хорошую герметичность и быструю замену.

Конусность устанавливают в зависимости от действующего усилия. При диаметре электрода до 25 мм конусность 1:10, а более 25 мм — 1:5. Конусы обычно применяют наружные, реже — внутренние.

Иногда электроды имеют цилиндрические поверхности крепления. В этом случае их зажимают специальными зажимами или крепят конусными резьбовыми соединениями (рис. 4.5, в).

Электроды имеют внутренний канал, по которому охлаждающую воду подводят к рабочей поверхности. Оптимальный диаметр канала  $d_k = (0,5–0,6) D_s$ , а расстояние его от рабочей поверхности  $h = (0,75–0,8) D_s$  для новых электродов ( $D_s$  — наружный диаметр стержня электрода).

Иногда применяют электроды со сменной рабочей частью, которую можно закреплять накидной гайкой, припаивать или запрессовывать. Для подавления внутренних выплесков изредка применяют электроды комбинированной конструкции с наружной обжимной втулкой, которая через тарельчатые пружины сдавливает место сварки. Этим создается искусственное перераспределение общего сварочного усилия для дополнительного обжатия периферии соединения.

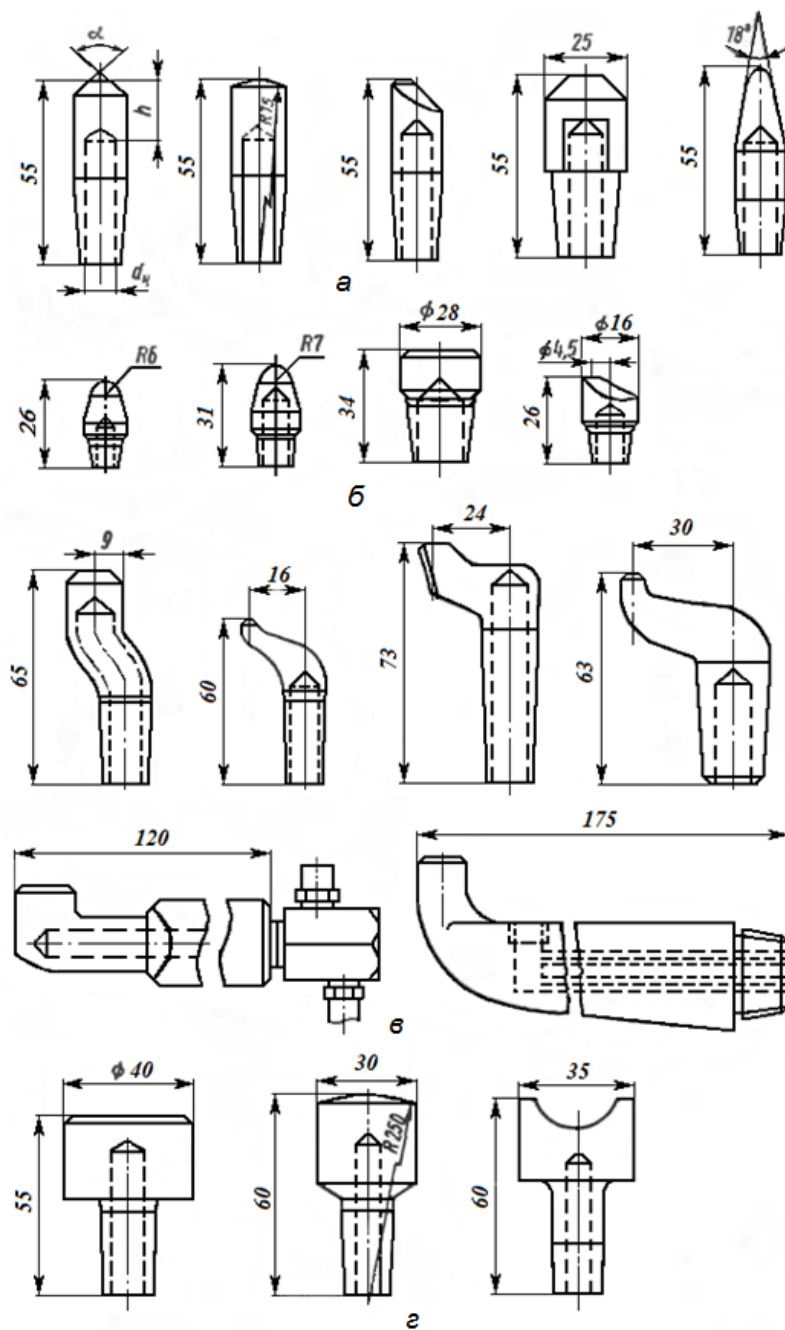


Рис. 4.5. Электроды для точечных машин: *a* — цилиндрические; *б* — цилиндрические укороченные; *в* — со смещенной рабочей частью (сапожковые) горизонтальные; *г* — с развитой рабочей частью



Конструкция электродов многоэлектродных точечных машин зависит от принятой схемы подвода тока. При двусторонней нормальной сварке они не отличаются от электродов обычных точечных машин. При одностороннем подводе тока детали для сварки укладывают на токоподводы, на которых и закрепляют электроды. В этом случае их называют контрэлектродами. Токоподводы, кроме восприятия усилия от электродов, должны обеспечить максимальное шунтирование тока. В простейшем случае нижний электрод представляет собой сплошную шину (токоподвод), изготовленную из меди или бронзы. Целесообразнее использовать контрэлектроды со сменной рабочей частью.

### **4.3. Особенности технологии сварки различных металлов и сплавов**

---

В процессе термомеханического цикла сварки происходят, как правило, неблагоприятные изменения структуры и свойств металла, образуются различные дефекты. Чувствительность металла к изменению структуры и свойств, образованию дефектов качественно и количественно оценивают понятием технологической свариваемости. Очевидно, что, управляя технологией сварочного процесса, можно эффективно влиять на свойства металла в зоне сварки, склонность к возникновению дефектов. Для каждого металла и толщины деталей можно найти некоторый оптимальный режим (оптимальное сочетание параметров режима), который обеспечивал бы получение соединений необходимого качества, т. е. нужных размеров и прочности, без дефектов, с минимальными структурными изменениями и короблением, с сохранением антикоррозионных и других свойств. Этот режим должен одновременно обеспечивать высокую стойкость электродов, необходимую производительность, минимальную трудоемкость и т. п. При выборе такого режима необходимо учитывать особенности процесса сварки и свойства свариваемых металлов.

#### **4.3.1. Программирование процессов контактной сварки**

Точечная и шовная сварка имеют ряд особенностей: надежную герметизацию и защиту от атмосферных газов; высокое давление в зоне сварки на всех стадиях процесса; интенсивное перемешивание металла; кратковременность нагрева и минимальную протяженность зоны термического влияния; высокую концентрацию напряжений на периферийных участках точек.

Современное оборудование для контактной сварки позволяет в широких пределах регулировать процессы нагрева и деформирования металла и таким образом эффективно управлять термомеханическим циклом. У большинства современных технологических систем имеется возможность регулирования скорости нагрева и охлаждения; предварительного и повторного нагрева внутри цикла сварки; ступенчатого и в ряде случаев плавного изме-

нения давления электродов за цикл, а следовательно, эффективного управления значением и знаком остаточных напряжений.

Программирование режима заключается в рациональном выборе формы импульса сварочного тока и изменении сварочного усилия за цикл сварки, а также их временных параметров, что дает возможность эффективно управлять качеством соединений и обеспечивать условия для предупреждения дефектов.

Наиболее рациональная циклограмма изменения усилия и тока, характерная для точечной и, частично, шовной сварки, приведена на рис. 4.6. Циклограмма усилия имеет три части: I, II, III — примерные границы этапов формирования соединения.

На I этапе предварительное сжатие  $F_{сж}$  служит для устранения зазоров между деталями, получения требуемых значений  $r_{эз}$  в холодном состоянии, предупреждения начальных наружных и внутренних выплесков, вытеснения технологических прослоек.

Монотонное нарастание  $F_{св}$  на II этапе позволяет поддерживать постоянство давления между деталями, компенсируя рост площади контактов и диаметра жидкого ядра.

На III этапе условно выделяют два участка —  $a$  и  $b$ . На участке  $a$ , небольшом по длительности (обычно 0,02–0,1 с), усилие  $F_{св}$  постоянно, эта выдержка необходима для начала кристаллизации, частичного охлаждения слоев металла и, следовательно, предупреждения глубоких вмятин при проковке.

На участке  $b$  усилие сжатия значительно увеличивают до  $F_{ков}$  (усилие проковки) и поддерживают длительно почти до полного охлаждения в целях снижения растягивающих напряжений, предупреждения горячих трещин и раковин, а также уменьшения короблений узлов.

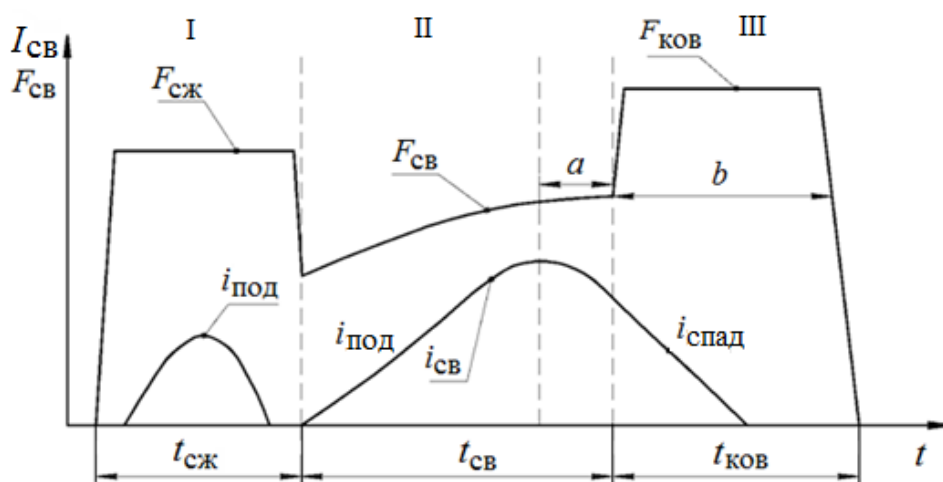


Рис. 4.6. Рациональная циклограмма точечной сварки

Циклограмма тока тоже имеет три части в соответствии с этапами процесса: ток подогрева  $i_{\text{под}}$ , возрастающий ток сварки  $i_{\text{св}}$  и спадающий ток  $i_{\text{спад}}$  для замедления охлаждения. Скорость нарастания и спада токов, а также их длительность должны соответствовать материалам и толщинам свариваемой конструкции, так как они определяют скорость нагрева и охлаждения металла.

На практике в зависимости от толщины, свойств, конфигурации и ответственности узлов, качества сборки, а также реальных возможностей сварочного оборудования циклограмма усилия может быть упрощена. В частности, оборудование для плавного изменения усилия сжатия пока не получило широкого распространения, поэтому его изменяют ступенчато.

При точечной сварке наиболее часто используют циклограмму с постоянным усилием (рис. 4.7, *а*) и сварочным импульсом переменного тока (рис. 4.8, *а*). Сварка металлов относительно небольшой толщины (до 3 мм) не требует повышенного усилия проковки. Для деталей большой толщины и имеющих склонность к горячим трещинам металлов применяют циклограмму (рис. 4.7, *б*) с усилием проковки  $F_{\text{ков}}$ .

Время приложения усилия должно быть с небольшим запаздыванием  $t_{\text{ков}} = 0,025\text{--}0,18$  с. При запаздывании проковки на большее время металл успевает закристаллизоваться с образованием трещин. При ранней проковке увеличиваются пластические деформации и появляются глубокие вмятины. Проковка, кроме предотвращения образования трещин, устраняет усадочные дефекты в литом ядре, снижает общую деформацию изделия и существенно повышает усталостную прочность соединения.

Для устранения зазоров и предупреждения выплесков, а также при сварке деталей с предварительно нанесенным покрытием (клеем, лаком, грунтом) используют циклограмму, представленную на рис. 4.7, *в*. Например, при сварке деталей большой толщины (5 мм и более) для снижения и стабилизации контактного сопротивления применяют предварительное сжатие с повышенным усилием. Циклограмму на рис. 4.7, *г*, наиболее соответствующую теоретической циклограмме (см. рис. 4.6), используют при сварке деталей толщиной свыше 4 мм.

Программу нагрева зоны сварки в большинстве случаев задают в виде одного импульса сварочного тока, как это показано на рис. 4.7, *а–г*. Жесткий или мягкий режим получают, изменяя длительность сварочного импульса и его величину.

В некоторых случаях, для устранения сборочных зазоров и предупреждения внутренних выплесков, используют предварительный подогрев зоны сварки дополнительным, до сварочного, подогревающим импульсом тока (циклограмма тока на рис. 4.7, *д*). Циклограмма усилия при этом может быть различной (рис. 4.7, *а–г*). Частично для этих же целей снижают скорость нагрева за счет модулирования переднего фронта сварочного тока длительностью  $t_n$  (рис. 4.9, *г*).

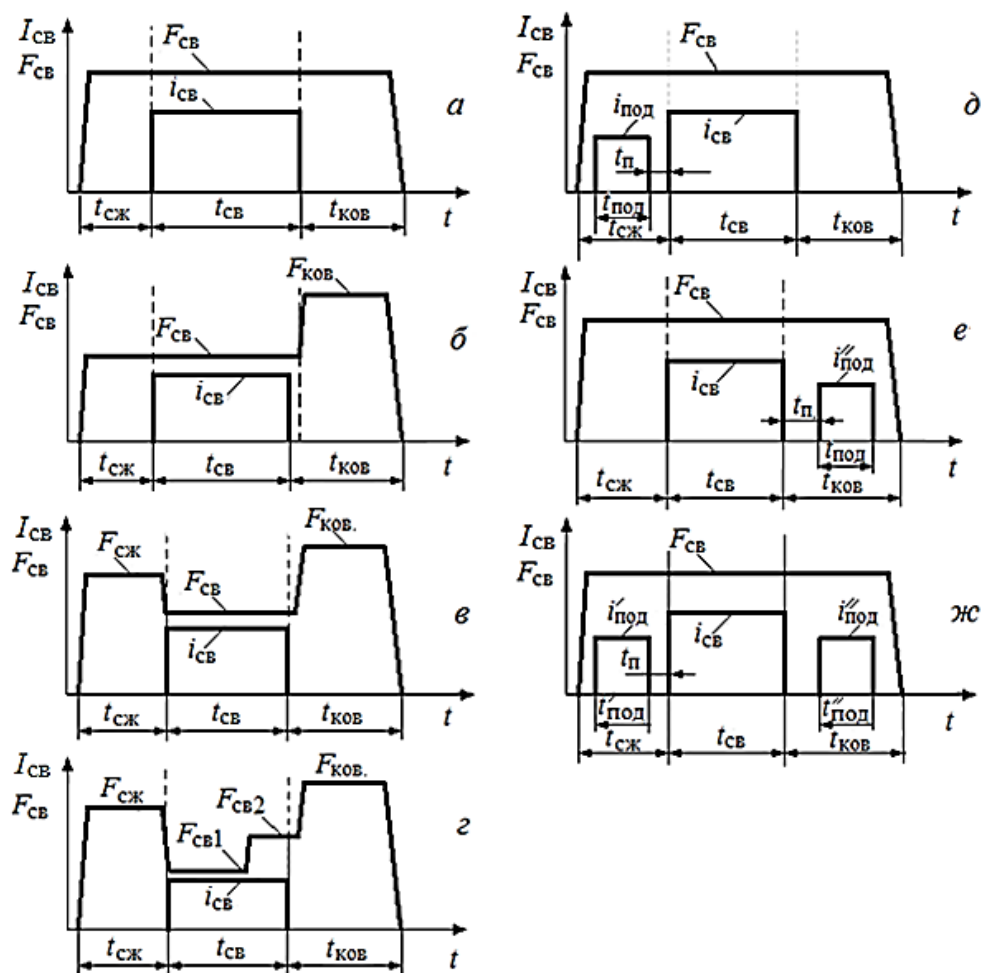


Рис. 4.7. Циклограмма тока и усилия при точечной сварке: *а* — с постоянным усилием сварки; *б* — с приложением ковочного усилия; *в* — с предварительным сжатием и проковкой; *г* — со ступенчатым изменением сварочного усилия, проковкой и обжатием; *д* — с предварительным подогревом; *е* — с последующим подогревом; *ж* — с тремя импульсами: сварочным, подогревающими предварительным и последующим

В целях проведения термообработки, снижения величины усилия проковки  $F_{\text{ков}}$ , в частности снижения вероятности возникновения горячих трещин, применяют подогрев дополнительным после сварочного импульсом тока (циклограмма тока на рис. 4.7, *е*) в сочетании с любой циклограммой усилия. Скорость охлаждения уменьшают также путем замедленного спада заднего фронта импульса сварочного тока за время  $t_{\text{сп}}$  (рис. 4.8, *б–г*).

В случае сварки нетехнологичных конструкций и материалов с ограниченной свариваемостью можно использовать оба дополнительных импульса тока (циклограмма тока на рис. 4.7, *ж*), модуляцию как переднего, так и заднего фронта импульса сварочного тока (рис. 4.8, *з*, *д*).

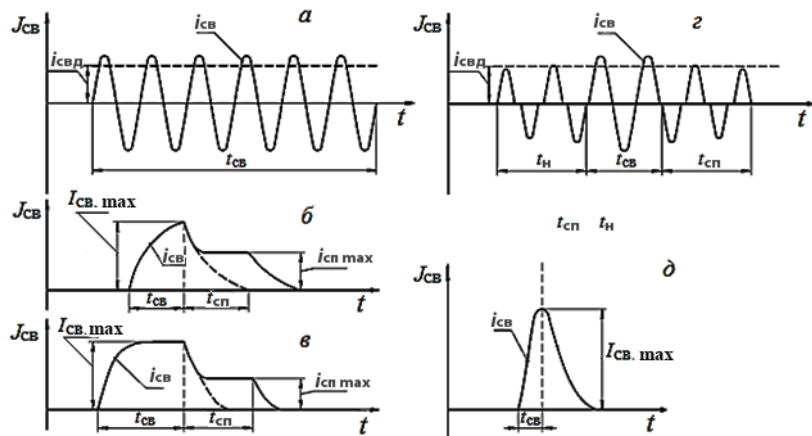


Рис. 4.8. Формы импульсов сварочного тока в машинах разного типа: *а* — переменного тока; *б* — низкочастотных; *в* — с выпрямлением тока во вторичном контуре; *з* — переменного тока с модуляцией; *д* — конденсаторных

При шовной сварке герметичным швом формирование литой зоны обеспечивается одним импульсом тока при постоянном сварочном усилии. Шовную сварку осуществляют при непрерывном (см. рис. 4.7, *а*) или прерывистом (импульсном) включении тока, а также с остановкой вращения роликов на время пропускания сварочного импульса (шаговая сварка). Наибольшее распространение получила сварка с включением тока отдельными импульсами при непрерывном вращении. Пауза между импульсами  $t_{\text{п}}$  позволяет снизить температуру роликов и частично охладить детали, в результате уменьшается зона термического влияния, снижаются остаточные деформации, а стойкость роликов несколько возрастает.

При непрерывном включении тока (рис. 4.9, *а*) значительно повышается скорость сварки, но снижаются качество шва и стойкость электродов. Крупногабаритные детали большой толщины соединяют при шаговом вращении роликов (рис. 4.9, *в*) с остановкой роликов в момент пропускания импульса тока, что способствует интенсивному охлаждению деталей и рабочей поверхности роликов. Стойкость электродов возрастает в результате стабилизации контактов, отсутствия проскальзывания роликов, снижения температуры контакта электрод—деталь, уменьшения массопереноса. Остановка роликов позволяет приложить ковочное усилие  $F_{\text{ков}}$ , что расширяет технологические возможности сварочного процесса. Наиболее часто на практике применяется сварка с непрерывным вращением роликов и прерывистым включением тока (рис. 4.9, *б*).

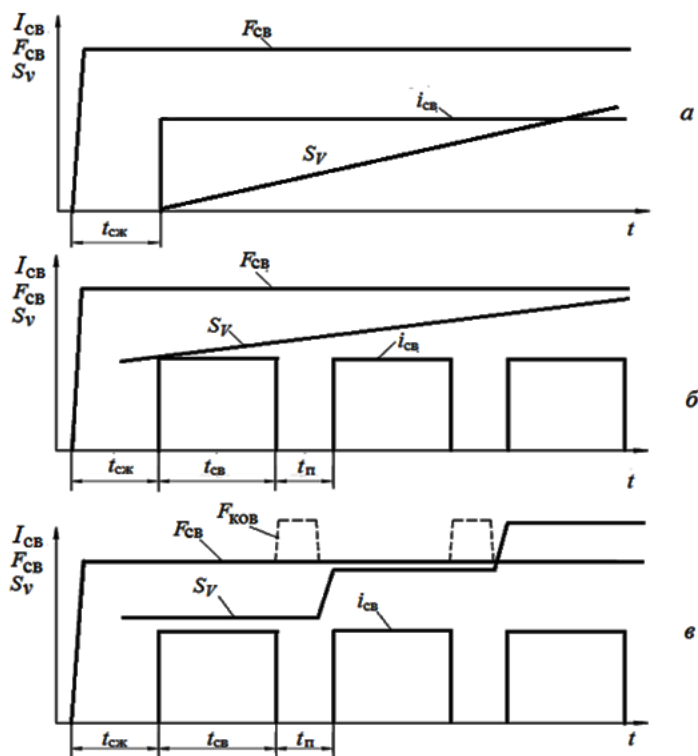


Рис. 4.9. Циклограмма шовной сварки: *a* — с непрерывным вращением роликов и непрерывным сварочным импульсом; *б* — с непрерывным вращением роликов и отдельными импульсами сварочного тока (прерывистая); *в* — с остановкой роликов во время пропуска отдельного сварочного импульса с постоянным усилием или проковкой (шаговая)

#### 4.3.2. Параметры режимов контактной сварки

Режимом сварки называется совокупность электрических, механических и временных параметров, обеспечиваемых сварочным оборудованием и необходимых для получения качественного сварного соединения.

Существенное влияние на режим сварки оказывают многие физико-химические, теплофизические и механические свойства металлов, тип и параметры кристаллической решетки, величина интервала кристаллизации и температурного интервала хрупкости, свойства оксидных пленок и др.

Удельное электросопротивление  $\rho_0$  во многом определяет сварочный ток. Чем меньше  $\rho_0$ , тем больше должен быть  $I_{CB}$ . Например, при сварке алюминиевых сплавов требуются токи значительно большие, чем при сварке сталей.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и связанный с ним коэффициент температуропроводности  $a$  определяют потери (рассеяние) теплоты в околошовную зону и основной металл. Теплофизические свойства влияют на протя-

женность околошовной зоны и температуру в контактах. С увеличением  $\lambda$  уменьшают  $t_{св}$ , используют более жесткие режимы.

Температура плавления сплава ( $T_{пл}$ ) обуславливает затраты теплоты на образование соединения, следовательно, определяет значение  $I_{св}$ , уровень температуры контакта электрод—деталь, тем самым влияя на интенсивность массопереноса в этом контакте.

С увеличением коэффициента линейного расширения  $\alpha$  и условного сопротивления пластической деформации  $\sigma_d$  металла повышается склонность к внутренним выплескам, возрастает уровень остаточных напряжений. При сварке металлов с большими значениями  $\sigma_d$  приходится значительно увеличивать  $F_{св}$ , применять более мягкий режим.

Интервал кристаллизации и температурный интервал хрупкости (ТИХ) определяют склонность к образованию горячих трещин. Чем шире ТИХ, тем выше склонность к горячим трещинам.

Тип и параметр кристаллической решетки, температура плавления определяют сродство при сварке разнородных сплавов, конечную структуру и свойства металла ядра.

Металлы с ростом температуры в большей или меньшей степени изменяют свои свойства ( $\rho_0$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ), поэтому нередко вводят предварительный подогрев дополнительным импульсом тока (для повышения  $\rho_0$ , уменьшения  $\lambda$  и  $a$ ). Это позволяет снизить сварочный ток и облегчить формирование соединений. Электрические и физико-механические свойства поверхностных пленок влияют на тепловыделение в контактах и процессы массопереноса в контактах электрод—деталь.

Исходными данными для выбора режима служат свойства и толщина металла, подготовка его поверхности, возможности сварочного оборудования и требования к качеству. Параметры режима выбирают по таблицам, номограммам, рассчитывают или устанавливают опытным путем. Выбранные или расчетные режимы проверяют и уточняют для конкретных условий.

Основные параметры режимов точечной, рельефной и шовной сварки:

- сила сварочного тока  $I_{св}$ ;
- усилие сжатия  $F_{св}$ ;
- время импульса  $t_{св}$ .

Для точечной и шовной сварки:

- диаметр электрода  $d_{эл}$ ;
- ширина ролика  $f_p$ .

Для шовной сварки к основным параметрам относят также:

- время паузы  $t_n$ ;
- скорость сварки  $V_{св}$ ;
- шаг точек  $t_{ш}$ .

Для каждого из этих способов есть еще ряд дополнительных параметров, обусловленных особенностями применяемых циклов.

Для точечной сварки время протекания тока  $t_{\text{св}}$  (с) при сварке низкоуглеродистой стали принимается  $(0,01-0,02)s$  на жестком режиме и  $(0,2-0,4)s$  — на мягком.

Ориентировочно необходимую величину сварочного тока можно оценить по следующей зависимости:

$$I_{\text{св}} = jF_{\text{с}},$$

где  $j$  — плотность тока; при сварке низкоуглеродистой стали обычно принимают  $200-400 \text{ А/мм}^2$  для жестких режимов и  $80-160 \text{ А/мм}^2$  — для мягких;

$F_{\text{с}}$  — площадь контактной поверхности электрода.

При сварке стали рабочая часть электрода обычно выполняется в виде усеченного конуса с плоским контактом, реже — в виде цилиндра со сферической контактной поверхностью. При плоском контакте его диаметр рекомендуется выбирать по следующим формулам:

$$d_{\text{с}} = 2s + (2-3) \text{ мм при } s < 2 \text{ мм};$$

$$d_{\text{с}} = 1,5s + 5 \text{ мм при } s > 2 \text{ мм}.$$

Сферическая контактная поверхность электродов при сварке стали обычно имеет радиус  $50-100 \text{ мм}$ .

При нормальной эксплуатации увеличение диаметра контактной поверхности электрода в результате его износа не должно превышать  $15-20 \%$ .

Усилие сжатия электродов зависит от толщины свариваемых деталей и от длительности нагрева. Ориентировочно при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали оно может быть определено по следующим формулам:

$$F_{\text{св}} = (100-200)s H \text{ — на «жестких» режимах};$$

$$F_{\text{св}} = (60-100)s H \text{ — на «мягких» режимах}.$$

При сварке холоднокатаной стали усилие повышается на  $20-30 \%$ .

Усилие сжатия электродов может быть определено по величине удельного давления  $p$ :

$$F_{\text{св}} = \pi p d^2 / 4.$$

При сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали на жестком режиме  $p = 50-120 \text{ МПа}$ , на мягком —  $p = 30-60 \text{ МПа}$ .

Скорость шовной сварки (м/мин) выбирают с учетом требуемого перекрытия и шага  $t_{\text{ш}}$ :

$$V_{\text{св}} = 0,06 t_{\text{ш}} / (t_{\text{св}} + t_{\text{п}}),$$

где  $t_{\text{св}}$  и  $t_{\text{п}}$  — соответственно длительность импульса тока и паузы (с).

При сварке легких сплавов минимальный шаг увеличивается на  $15 \%$ , а при сварке аустенитной стали и жаропрочных сплавов шаг может быть увеличен также на  $15 \%$ .

Для шовной сварки величину сварочного тока увеличивают на  $15-20 \%$  по сравнению с точечной.

Иногда на шовных машинах выполняют шовно-точечную сварку с большим шагом без перекрытия литых ядер. При этом способе ролики машины плотно прижимают металл в течение всей продолжительности импуль-



са. Шаг между точками выдерживается постоянным, точки располагаются на одной линии, что улучшает внешний вид соединения.

При стыковой сварке сопротивлением для образования качественного соединения основное внимание уделяют получению равномерного нагрева торцов деталей и деформации металла, в наибольшей степени обеспечивающей разрушение и удаление оксидов.

Основные параметры режима: сварочный ток  $I_{\text{св}}$  или плотность тока  $j$ , время протекания тока  $t_{\text{св}}$ , начальное усилие сжатия  $F_{\text{н}}$  и усилие осадки  $F_{\text{ос}}$  (соответственно начальное давление  $p_{\text{н}}$  и давление осадки  $p_{\text{ос}}$ ), осадка, т. е. укорочение деталей при сварке  $\Delta_{\text{св}}$ , установочная длина  $l_0$ .

Для большинства изделий плотность тока назначается от 10 до 250 А/мм<sup>2</sup>, меньшая плотность — для больших сечений. Но при этом необходимо обеспечить правильное соотношение между  $j$  и  $t_{\text{св}}$ , используя эмпирическую зависимость

$$j\sqrt{t_{\text{св}}} = k10^3,$$

где  $k$  — коэффициент, равный 8–10 для сталей, 20 — для алюминия, 27 — для меди.

Наиболее часто нагрев при стыковой сварке сопротивлением контролируется укорочением заготовок, реже — длительностью. Сварочный ток в первом случае отключается после укорочения заготовок на определенную величину, причем если заданное укорочение велико, то может произойти перегрев и даже расплавление металла с появлением большого количества высаженного металла. При малом укорочении в стыке останутся непроваренные участки с оксидами. Оптимальная величина укорочения увеличивается с увеличением площади свариваемого сечения и наличием на ней загрязнений. Она составляет для малоуглеродистых сталей при сечении 25–100 мм<sup>2</sup> 0,8–1 мм, при сечении 250 мм<sup>2</sup> — 1,5–1,8 мм и при сечении 500–1000 мм<sup>2</sup> — 2–2,5 мм. При сварке закаливающихся сталей эти значения увеличиваются на 15–25 %. Величина осадки без тока примерно такая же. Осадочное давление изменяется от 10 до 50 МПа. Для низкоуглеродистой стали рекомендуется 10–20 МПа. Если нагрев производится при одном давлении, а осадка — при другом, то давление при сварке некоторых легированных сталей в защитной среде может достигать 10–15 МПа и более, т. е. оно будет таким же, как при сварке оплавлением. В этом случае при широкой зоне нагрева необходимое удельное давление можно определить приближенно по формуле

$$P_{\text{ос}} = \left( 1 + 0,25\alpha \frac{F}{2\Delta_{\text{н}}S} \right) \sigma_{\text{т}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент объемно-напряженного состояния, для круглого сечения равный 1,3, для квадрата — 2, для прямоугольника — 2,3, для сечения сложной формы — 2,5;  $F$  — площадь сечения;  $\Delta_{\text{н}}$  — ширина зоны нагрева од-

ной детали выше  $900^{\circ}$ ;  $S$  — периметр;  $\sigma_T$  — предел текучести при температуре, средней между температурой сварки и  $900^{\circ}\text{C}$ .

Малое давление облегчает нагрев металла, однако его чрезмерное уменьшение вызывает перегрев, выплески, пористость в околостыковой зоне и не обеспечивает закрытия стыка без окислов. При очень большом давлении не достигается сварочная температура в стыке и растет количество высаженного металла.

Установочная длина  $l_0$ , определяющая ширину зоны нагретого металла и устойчивость свариваемых концов, принимается минимально возможной, но исключающей заметный теплоотвод в электроды и интенсивное охлаждение стыка. Установочная длина  $l_0$  обычно назначается в соответствии со следующим неравенством:  $l_0 \geq D_{\text{заг}}$ . Значения установочной длины в целях уменьшения потерь теплоты в электроды часто при сварке низкоуглеродистой стали увеличивают на 20–40 %, а при сварке легированных закаливающих сталей — на 10 %. При сварке разнородных сталей более теплопроводный металл сваривается с большей установочной длиной. Правильность выбора установочной длины в этом случае оценивается по равномерности нагрева с обеих сторон от стыка.

При стыковой сварке оплавлением параметры режима при этом способе зависят от теплопроводности и температуры плавления металла и определяются в основном скоростью оплавления. Скорость задается с учетом активности металла к взаимодействию с газами, процессов испарения легирующих элементов, а также сечения свариваемых деталей. Усилие осадки и скорость осадки определяются соответственно теплопроводностью металла и его активностью к окислению.

В соответствии с протекающими процессами, описанными выше, при формировании соединения сваркой оплавлением стремятся обеспечить:

1) нагрев деталей для оплавления торцов и пластического деформирования в целях удаления оксидов, а также для предупреждения образования неблагоприятных структур в околостыковой зоне;

2) локальную интенсивность оплавления перед осадкой для формирования равномерно оплавленного слоя металла, предупреждения окисления и получения благоприятного рельефа поверхности торцов;

3) деформацию деталей с достаточно большой скоростью, предупреждающей преждевременное остывание металла торцов и застревание оксидов в стыке; величина деформации должна обеспечивать определенное растекание металла в плоскости стыка и выравнивание рельефа поверхности, необходимое для выдавливания расплавленного металла и оксидов.

Основные параметры режима: скорость оплавления  $V_{\text{опл}}$ , плотность тока при оплавлении  $j_{\text{опл}}$ , припуск на оплавление  $\Delta_{\text{опл}}$ , время оплавления  $t_{\text{опл}}$ , величина осадки  $\Delta_{\text{ос}}$  и ее скорость  $V_{\text{ос}}$ , длительность осадки под током  $t_{\text{ос.т}}$ , величина осадки под током  $\Delta_{\text{ос.т}}$ , усилие осадки  $F_{\text{ос}}$  или давление осадки  $p_{\text{ос}}$ ,

установочная длина детали  $l_0$ . Задают также напряжение холостого хода машины  $U_{\text{х}}$  и программу его изменения. При сварке импульсным оплавлением указывают также частоту  $f_k$  и амплитуду колебаний  $A_k$  подвижной плиты машины. При сварке оплавлением с подогревом задают температуру подогрева  $T_{\text{под}}$ , длительность подогрева  $t_{\text{под}}$ , число импульсов подогрева и их длительность  $t_{\text{имп}}$ , припуск на подогрев  $\Delta_{\text{под}}$ .

Скорость оплавления  $V_{\text{опл}}$  выбирают из условий получения определенного распределения температур в деталях. Она зависит от плотности тока, степени подогрева и марки стали. При сварке непрерывным оплавлением она постепенно возрастает от 0 до 6–8 мм/с. Средняя скорость для заготовок из низкоуглеродистой стали составляет 0,5–1,5 мм/с, а заготовок из легированной стали — 2,5–3,5 мм/с. При сварке с подогревом она зависит от интенсивности нагрева или его длительности. Средняя скорость в этом случае для низкоуглеродистой стали составляет 1,5–2,5 мм/с, а для легированной — 3,5–4,5 мм/с. Длительность непрерывного оплавления составляет около 1 с на 30 мм<sup>2</sup> свариваемого компактного или 3–4 с на 1 мм толщины развернутого сечения (листы, трубы).

Оплавление с малой скоростью используется при сварке толстостенных изделий, когда необходимо получить наиболее широкую зону нагрева торцов. Например, чем больше активность металла к образованию оксидов и взаимодействию с газами атмосферы, тем больше должна быть скорость оплавления.

Так, при увеличении площади сечения свариваемых деталей должна увеличиваться величина осадки  $\Delta_{\text{ос}}$ , что связано с ростом рельефа торцевых поверхностей. При сварке с подогревом сопротивление пластической деформации значительно снижается на большей протяженности от торцов деталей, поэтому  $\Delta_{\text{ос}}$  необходимо увеличивать.

Величина усилия осадки  $P_{\text{ос}}$  зависит от площади сечения свариваемых деталей, прочности металлов при высоких температурах и скорости осадки. При непрерывном оплавлении  $P_{\text{ос}}$  в 1,5–2 раза больше, чем при сварке с подогревом. Часть осадки (примерно 0,5 $\Delta_{\text{ос}}$ ) осуществляют при включенном токе, что облегчает пластическую деформацию и уменьшает  $P_{\text{ос}}$ .

Чем выше скорость осадки  $v_{\text{ос}}$ , тем меньше время  $\Delta t_1$  на полное удаление окислов из стыка при постоянной скорости охлаждения, тем меньше вероятность их частичной фиксации в стыке. Очень высокая скорость осадки  $v_{\text{ос}}$  может ухудшить качество сварки вследствие слишком высокого темпа нарастания деформаций.

Припуск на оплавление  $\Delta_{\text{опл}}$  обеспечивает равномерный нагрев по сечению, оптимальное распределение температуры вдоль деталей, образование слоя расплавленного металла на торцах. Обычно  $\Delta_{\text{опл}}$  составляет 0,7–0,8 общего припуска на сварку. При сварке с подогревом и импульсным оплавлением  $\Delta_{\text{опл}}$  сокращается в 2–3 раза.

Плотность тока  $j_{\text{опл}}$  принимается такой, чтобы обеспечить процесс устойчивого оплавления. Она увеличивается с увеличением теплопроводности ме-

талла и  $V_{\text{опл}}$ , снижается при сварке с подогревом, а также при сварке деталей большого сечения. Плотность тока  $j_{\text{опл}}$  для изделий сечением 250–1000 мм<sup>2</sup> из сталей составляет 20–30 А/мм<sup>2</sup>, а при сварке крупных изделий — 5 А/мм<sup>2</sup>. При сварке с подогревом плотность тока не превышает 20 А/мм<sup>2</sup>.

Припуск на осадку  $\Delta_{\text{ос}}$  выбирают из условия удаления нагретого металла и оксидов из стыка. Обычно он составляет 0,3–0,2 от общего припуска. Припуск на осадку под током  $\Delta_{\text{ос.т}}$  связан со скоростью осадки  $V_{\text{ос}}$  и обычно составляет (0,5–0,8)  $\Delta_{\text{ос}}$ .

Кратковременные процессы оплавления, а также процессы, построенные на использовании больших мощностей, всегда требуют соответствующего увеличения  $\Delta_{\text{ос}}$ . С увеличением  $\Delta_{\text{опл}}$  и получением равномерно нагретых торцов, покрытых ровным слоем расплавленного металла,  $\Delta_{\text{ос}}$  при достаточной  $V_{\text{ос}}$  может существенно сокращаться. Применение защитных сред также позволяет существенно сократить  $\Delta_{\text{опл}}$  и  $\Delta_{\text{ос}}$ .

Удельное давление осадки  $p_{\text{ос}}$  зависит от природы свариваемого металла и степени нагрева деталей. Непосредственно с удельным давлением связан припуск на осадку  $\Delta_{\text{ос}}$ , который увеличивается с ростом площади свариваемого сечения и ширины зоны разогрева. Величина осадки и удельное давление определяются шириной зоны нагрева, прочностью металла при температуре сварки и схемой объемно-напряженного состояния. Его конкретные значения указываются при сварке каждого изделия.

Скорость осадки  $V_{\text{ос}}$  существенно влияет на степень очистки стыка от оксидных включений и пластичность соединений. Она не должна быть менее 10 мм/с при сварке высокоуглеродистой стали и чугуна, 15–30 мм/с — низкоуглеродистой стали, 30–50 мм/с — легированных сталей и 200 мм/с — меди, алюминиевых и других сплавов с легкоокисляющимися элементами.

Усилие зажатия  $F_{\text{зж}}$  выбирают из условия предупреждения проскальзывания деталей в губках при осадке:

$$F_{\text{зж}} = k_0 F_{\text{ос}},$$

коэффициент  $k_0$  обычно колеблется от 1,5 до 4 и зависит от свойств свариваемого металла, конструкции зажимов, наличия упоров, конфигурации деталей.

Напряжение холостого хода  $U_{2х}$  выбирают минимальным, обеспечивающим устойчивое оплавление,

Установочная длина деталей:

$$2l_0 = \Delta_{\text{опл}} + \Delta_{\text{ос}} + \Delta_{\text{к}},$$

где  $\Delta_{\text{к}}$  — конечное расстояние между зажимами. Обычно при сварке стальных круглых стержней и толстостенных труб  $l_0 = (0,7–1,0) d$ , где  $d$  — диаметр свариваемых деталей; для медных  $l_0 = 2d$ ; для полос  $l_0 = (4–5) s$ , где  $s$  — толщина полосы.

При малой  $I_0$  наблюдается большой отвод теплоты в электроды, а зона интенсивного нагрева сужается, что требует увеличения  $P_{oc}$ . С увеличением  $I_0$  увеличивается требуемая электрическая мощность и уменьшается жесткость деталей.

При стыковой сварке оплавлением в случае необходимости обеспечения требуемого термомодеформационного цикла ( $t_{ц.п}$  — цикл сварки оплавлением с подогревом) применяют предварительный подогрев деталей в течение времени  $t_{под}$  за счет кратковременного, периодически повторяющегося, короткого замыкания цепи, реализованного посредством возвратно-поступательного перемещения подвижной плиты машины. Нагрев отдельными импульсами  $t_{имп}$  (время импульса) тока  $I_{под}$  (ток подогрева) обеспечивает более равномерный нагрев торцов.

При сварке оплавлением с подогревом температуру подогрева  $T_{под}$  выбирают в зависимости от сечения свариваемых деталей и их металла. При сварке конструкционных сталей температура подогрева обычно составляет 800–1000 °С и возрастает до 1000–1200 °С при сварке деталей сечением 10000–20000 мм<sup>2</sup>. Температура подогрева деталей из труднодеформируемых аустенитных сталей на 100–150 °С выше. Время подогрева  $t_{под}$  возрастает с увеличением площади сечения деталей от нескольких секунд при сварке деталей сечением 500–1000 мм<sup>2</sup> до нескольких минут при сварке деталей сечением 15000–20000 мм<sup>2</sup>. Длительность импульсов подогрева  $t_{им}$  обычно составляет 1–8 с, а припуск на подогрев  $\Delta_{под}$  изменяется в пределах 1–12 мм в зависимости от сечения деталей и свойств свариваемого металла.

Применяемые режимы условно разделяют на несколько групп по их жесткости. В основе такого деления лежит плотность тока на контактной поверхности и продолжительность импульса. Большое значение плотности тока и меньшая продолжительность импульса соответствуют более жестким режимам. Такое условное определение жесткости режима по принятым значениям плотности тока возможно для деталей, изготовленных из одного материала и одной толщины.

### **4.3.3. Особенности точечной сварки отдельных конструкционных материалов**

#### **Низкоуглеродистые стали**

Самый распространенный материал для изготовления штамповочных конструкций — низкоуглеродистая тонколистовая качественная конструкционная сталь марок 08кп, 08Ю и других с содержанием углерода до 0,15 %. Этот металл обладает хорошей свариваемостью. Плотность тока и давление на контактной поверхности электродов могут назначаться в широких пределах — соответственно 80–600 А/мм<sup>2</sup> и 50–120 МПа.

На практике для сварки этих металлов обычно используют жесткие режимы с плотностью тока 200 А/мм<sup>2</sup> и выше. Применяют несколько вари-

антов режимов, что определяется конкретными условиями производства. В табл. 4.6 даны несколько вариантов режимов, получивших распространение в автомобильной промышленности.

Использование жестких режимов обеспечивает большую производительность, уменьшение деформации, повышение работоспособности соединений при переменных нагрузках, уменьшение расхода энергии, но при этом требуется улучшение подготовки поверхности деталей и сборки.

Таблица 4.6

Режимы точечной сварки низкоуглеродистых качественных сталей 08кп, 08Ю

Толщина детали, мм	Диаметр электрода, мм	Режим А			Режим Б			Режим В			Минимальный диаметр литого ядра точки, мм	Минимальное разрушающее усилие при срезе на одну точку, кН
		Сварочный ток, кА	Время импульса сварочного тока, с	Сварочное усилие, Н	Сварочный ток, кА	Время импульса сварочного тока, с	Сварочное усилие, Н	Сварочный ток, кА	Время импульса сварочного тока, с	Сварочное усилие, Н		
0,6	4,0	7,0	0,10	1250	6,0	0,10	1000	9,5	0,08	1500	3,0	2,0
0,8	4,5	9,0	0,12	1800	8,5	0,12	1250	10,5	0,08	1800	3,5	3,5
1,0	5,0	10,5	0,16	2250	9,5	0,20	1500	11,5	0,10	2000	4,0	4,0
1,2	6,0	11,5	0,20	3000	10,0	0,26	1800	13,5	0,14	2700	4,5	5,5
1,5	6,5	13,0	0,24	3500	11,0	0,34	2300				5,0	7,5
1,8	6,5				12,5	0,40	3000				5,5	9,0
2,0	7,5				12,5	0,48	3500				6,0	11,0
2,5	8,0				13,5	0,60	3500				7,0	15,0

### Среднеуглеродистые и низколегированные стали

Среднеуглеродистые и некоторые низколегированные стали (например, ЗОХГСА) склонны к закалке. Смягчение режимов сварки предупреждает образование закалочных структур. При мягких режимах увеличивается тепловложение и снижается скорость охлаждения. Однако это приводит к увеличению остаточных деформаций и снижению производительности. Более целесообразно применять двухимпульсные режимы, в которых второй импульс производится меньшим током и замедляет скорость охлаждения. Время паузы  $t_{\text{п}}$  между импульсом сварки  $t_{\text{св}}$  и импульсом термической обработки составляет  $t_{\text{п}} = (1,1-1,4) t_{\text{св}}$ . Длительность второго импульса для термической обработки (отпуска)  $t_{\text{т.о}} = (1,5-1,8) t_{\text{св}}$ , а сила тока  $I_{\text{т.о}} = (0,7-0,8) I_{\text{св}}$ .

Эти материалы более прочны в нагретом состоянии и требуют увеличения усилия сжатия на 15–20 %. В табл. 4.7 приведены рекомендованные режимы точечной сварки некоторых марок закаливающихся сталей с термической обработкой в электродах машины.

Таблица 4.7

Режимы точечной сварки закаливающих сталей 30ХГСА, 12Г2А, 23Х2НВФА, 40ХНМА, 25ХСНВФА

Толщина детали, мм	Сварка		Время паузы, с	Термическая обработка		Сварочное усилие, Н
	Сварочный ток, кА	Время импульса сварочного тока, с		Ток отпуска, кА	Время импульса тока отпуска, с	
0,5	5,0–6,0	0,32–0,40	0,3–0,5	4,0–5,0	0,50–0,60	2000–3000
0,8	5,5–6,2	0,36–0,44	0,4–0,6	4,5–5,2	0,60–0,74	2500–3500
1,0	6,2–6,7	0,42–0,50	0,6–0,7	4,8–5,5	0,68–0,78	4000–5000
1,5	8,7–9,2	0,56–0,64	0,8–1,1	6,2–7,4	0,86–0,96	6000–8000
2,0	10,0–11,0	0,74–0,84	1,0–1,4	7,0–8,0	1,10–1,30	8000–10000
2,5	11,5–12,5	1,00–1,10	1,1–1,5	8,0–9,0	1,30–1,90	10000–12000
3,0	13,0–14,0	1,20–1,40	1,3–1,6	9,0–10,0	1,80–2,20	11000–14000

### Высоколегированные стали и титановые сплавы

При сварке высоколегированных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, отличающихся повышенным электрическим сопротивлением, снижают сварочный ток на 35–50 % по сравнению со сваркой низкоуглеродистых сталей. Усилие сжатия увеличивают в 1,5–2 раза. Для этих сталей полезно обеспечить постепенное нарастание импульса сварочного тока. В табл. 4.8 приведены режимы точечной сварки для материалов этой группы.

Титановые сплавы по теплофизическим и механическим свойствам приближаются к коррозионно-стойким сталям предыдущей группы. Сварочный ток ниже на 30–40 % по сравнению с низкоуглеродистыми сталями вследствие низкой их теплопроводности и электропроводности. Однако их сравнительно низкая жаропрочность не требует увеличения  $F_{св}$ .

Таблица 4.8

Режимы точечной сварки сталей 12Х18Н9Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М2Т

Толщина детали, мм	Сварочный ток, кА	Время импульса сварочного тока, с	Сварочное усилие, Н
0,5	4,5–5,0	0,08–0,12	2500–3000
0,8	4,5–5,0	0,12–0,16	3000–4000
1,0	5,0–5,7	0,14–0,18	3500–5000
1,5	7,0–8,0	0,20–0,24	5000–7000
2,0	8,0–9,0	0,24–0,30	8000–9500
2,5	8,5–9,5	0,30–0,34	10000–11000
3,0	10,0–11,0	0,34–0,38	12000–14000

### Цветные сплавы

Многочисленную группу легких алюминиевых сплавов сваривают точечной сваркой на весьма жестких режимах. Сварочный ток по сравнению со сварочным током при сварке низкоуглеродистых сталей увеличивают в 3–5 раз.

Параметры режима при сварке этих материалов зависят от термической обработки сплава. Термообработанные сплавы обычно склонны к горячим трещинам в ядре. Эффективным средством для предупреждения такого дефекта является проковка с повышенным усилием  $F_k$ . К этой же группе относят магниевые сплавы, которые, в отличие от алюминиевых, имеют повышенную пластичность, поэтому их сваривают с меньшими усилиями сжатия.

Ориентировочные режимы сварки этих материалов приведены в табл. 4.9.

Сплавы на медной основе также отличаются высокой теплопроводностью, электропроводимостью и пластичностью. Жесткость режима сварки повышается по мере увеличения этих показателей. Сварочные усилия выбирают так же, как при сварке низкоуглеродистых сталей. Чистую медь вследствие высокой теплопроводности и электропроводности сваривают со сквозным проплавлением. Чтобы электроды не приварились к поверхности меди и уменьшился отвод теплоты, применяют тепловой экран в виде тонкой фольги из коррозионно-стойкой стали, которую прокладывают между электродами и поверхностью детали. Иногда применяют электроды со вставками из вольфрама или молибдена, что также уменьшает отвод теплоты в электроды.

Химически активные тугоплавкие металлы (W, Mo и др.) имеют высокие температуру плавления, теплопроводность и электропроводность. Эти свойства существенно осложняют их точечную сварку. Температура на их поверхности достигает  $(0,5-0,6) T_{пл}$ , что приводит к оплавлению электродов на медной основе. Для сварки применяют многоимпульсный режим, снижающий температуру нагрева рабочей поверхности электрода.

Таблица 4.9

Режимы точечной сварки легких сплавов

Сплав	Толщина детали, мм	Сварочный ток, кА	Время сварочного импульса, с	Усилие, Н		Время проковки, с
				сварочное	проковки	
Алюминиевые сплавы: Д16М, Д19М, АМц, АМг	1*	35	0,06	3000	-	-
	3**	70	0,16	8200	19000	0,04
Магниевые сплавы: МА1, МА2, МА8, МА2-1	1*	30	0,04	2500	-	-
	3**	48	0,14	6300	20000	0,06
* Для электродов со сферической формой поверхности радиусом $R_{эл} = 75$ мм						
** Для электродов со сферической формой поверхности радиусом $R_{эл} = 150$ мм.						



#### 4.3.4. Особенности точечной сварки разных соединений

**Сварка различных металлов друг с другом** осложняется их различными физическими и химическими свойствами. В результате интенсивного перемешивания расплавленного металла в литом ядре образуется металл нового химического состава. Если у свариваемых металлов различны теплопроводность и электропроводимость, то литое ядро смещается в сторону детали с меньшими значениями этих характеристик. В таких случаях симметрию можно восстановить, регулируя отвод теплоты в электроды путем изменения диаметра рабочей поверхности электрода и подбирая материал электрода с соответствующими теплопроводностью и электропроводимостью.

Хорошая свариваемость разнородных металлов не всегда возможна, особенно при резком различии их свойств. Как правило, химически совместимы сплавы, полученные на одной основе или имеющие разную основу, но образующие между собой непрерывный ряд твердых растворов (например,  $\text{AMg6} + \text{D16T}$ ,  $1420 + \text{D16}$ ,  $\text{OT 4} + \text{BT 5}$ ,  $\text{Ст 3} + 30\text{ХГСА}$ , а также  $\text{Nb} + \text{Zr}$ ,  $\text{Fe} + \text{V}$ ,  $\text{Ti} + \text{V}$ ,  $\text{Ti} + \text{Zr}$ ,  $\text{Ni} + \text{сталь}$  и др.). В большинстве случаев сплавы на разной основе оказываются химически несовместимыми, так как образуют в ядре сплавы с неблагоприятными свойствами (хрупкие химические соединения, механические смеси). Например, при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, имеющих близкие физико-механические свойства, в ядре образуются хрупкие интерметаллиды, в результате чего сварные соединения разрушаются. Такое же явление возникает при соединении сплавов титана со сталью, алюминиевыми сплавами и многих других пар металлов. При сварке стали с алюминием возникают хрупкие интерметаллидные фазы железа с алюминием, значительно снижающие механические показатели. При применении оцинкованных алюминиевых листов прочность соединения существенно возрастает, так как легирование расплавленного алюминия цинком изменяет условия образования хрупких фаз. Для улучшения свариваемости разнородных сталей иногда целесообразно введение в контакт между деталью и электродами стальных прокладок (экранов), которые являются дополнительными источниками теплоты и одновременно уменьшают отвод теплоты в электроды.

**Сварка деталей неравной толщины** достаточно часто встречается на практике. При этом, по сравнению со сваркой деталей одинаковой толщины, усиливается поток теплоты в электрод со стороны более тонкой детали. На периферии контакта между деталями увеличивается плотность тока. Все это приводит к смещению литого ядра относительно плоскости соединения деталей в деталь большей толщины (рис. 4.10). Проплавление тонкой детали уменьшается, что может привести к полному непровару. Это проявляется при отношении толщин более 1:3 для стальных деталей и 1:2 для деталей из высокоэлектропроводных сплавов.

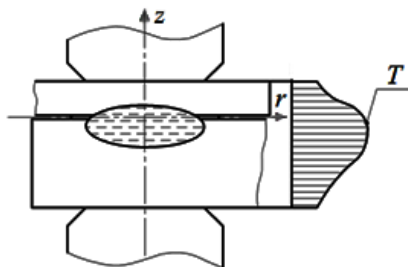


Рис. 4.10. Распределение температуры по сечению деталей при сварке деталей неравной толщины

Для предупреждения смещения литого ядра в деталь большей толщины можно использовать различные способы повышения температуры нагрева тонкой детали. Для сварки таких соединений применяют жесткие режимы. Электрод, находящийся в контакте с тонкой деталью, должен иметь меньший диаметр, а электродный металл — меньшую теплопроводность. В результате снижается отвод теплоты в электрод от тонкой детали. Иногда выполняют рельефы, которые увеличивают и стабилизируют плотность тока в контакте между деталями.

Стабилизации расположения литого ядра способствует также применение тепловых экранов между тонкой деталью и электродами (рис. 4.11, а). Они служат преградой на пути отвода теплоты в электрод. Изменяя толщину и металл экранов, можно смещать зону расплавления в требуемых пределах. Обычно используют сменные экраны из менее теплопроводного металла небольшой толщины (0,05–0,15 мм). Этот металл не должен свариваться с основным металлом. Часто применяют сварку с дополнительным кольцевым обжатием тонкой детали вокруг электрода (рис. 4.11, б). Обжатие уплотняющего пояса меняет характер протекания термомодеформационных процессов, снижаются значения контактных сопротивлений, увеличивается плотность тока в тонкой детали. При сварке на мягких режимах путем резкого сокращения центрального (сварочного) усилия по сравнению с обычной сваркой существенно снижается отвод теплоты от тонкой детали в электрод. Общее усилие сжатия  $F_{\text{св}}$  специальным электродным устройством разделяют на два усилия:  $F_{\text{м}}$ , прикладываемое в центре, и  $F_{\text{п}}$ , сжимающее периферийный участок точки. Этот способ практически полностью исключает выплески и применяется при сварке на жестких и мягких режимах. Его также применяют при сварке малопластичных материалов.

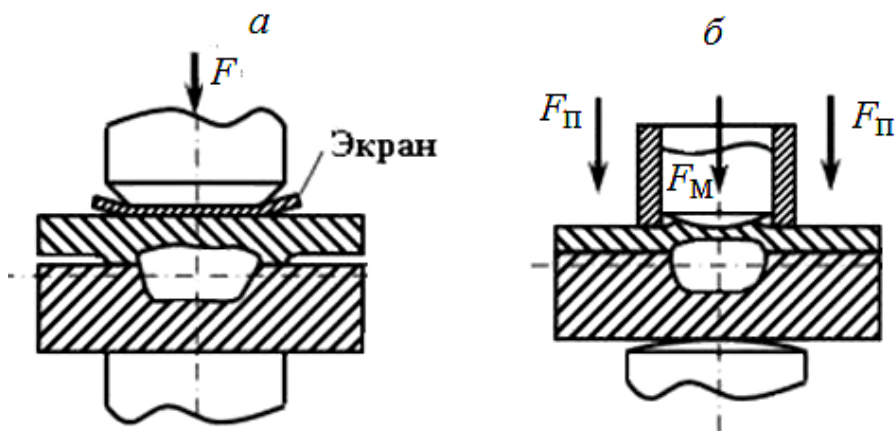


Рис. 4.11. Точечное соединение деталей разной толщины: *а* — с помощью экрана; *б* — с дополнительным регулируемым обжатием периферийной зоны  $F_{\Pi}$ ,  $F_M$

**Сварка материалов с защитными покрытиями** широко используется в штамповарных конструкциях. Для покрытия используют цинк, свинец, олово, алюминий, хром и др. Покрытие изменяет контактное и общее сопротивление в месте сварки, следовательно, меняются и условия нагрева. Если при сварке непокрытых сталей сопротивление  $r_{\text{эз}}$  после кратковременного спада несколько возрастает и достигает максимума в момент расплавления ядра, то при сварке металла с относительно легкоплавкими покрытиями максимальное сопротивление устанавливается позднее и имеет меньшее значение. Это объясняется большими размерами площади контакта электрод—деталь и, особенно, деталь—деталь. Для сварки таких материалов необходимо соответственно изменять параметры режима сварки.

Условия работы электродов при сварке материалов с покрытиями ухудшаются, так как металл покрытия частично переходит на поверхность электрода, плакируя ее, окисляясь и образуя новые сплавы. Механизм разрушения и переноса особенно легкоплавких покрытий — комплексный процесс, состоящий из холодного и горячего схватывания, термодиффузии, электропереноса и сублимации. Все это существенно увеличивает сопротивление в контакте электрод—деталь, снижает их стойкость и приводит к частой зачистке рабочей поверхности электрода.

В автомобилестроении и других отраслях промышленности применяют оцинкованную низкоуглеродистую сталь. Для ее сварки используют жесткие режимы, увеличивая сварочный ток до 20 %, усилия на электродах до 40 % и продолжительность импульса сварочного тока до 90 % по сравнению с режимами сварки непокрытой стали. Для сохранения покрытия в месте контакта с электродами существенно увеличивают длительность

проковки после выключения сварочного тока. В этот момент слой цинка, расплавленный при сварке, застывает и в меньшем количестве переходит на контактную поверхность электродов. При сварке оцинкованных сталей лучшую стойкость имеют электроды из сплава БрХЦр. Важно обеспечить интенсивное охлаждение электродов, что достигается при расходе воды не менее 7 л/мин.

При сварке хромированных и никелированных сталей в месте контакта возникает несколько увеличенное электрическое сопротивление. Сваривают такие стали на жестких режимах, увеличивая время прохождения тока и усилие сжатия на 20–25 % по сравнению с этими же параметрами при сварке непокрытых сталей.

Для придания поверхности свариваемых деталей антикоррозионных свойств часто применяют неметаллические покрытия: защитные лаки, смеси лаков с металлическим порошком, фосфатные покрытия, полученные методом электроосаждения, и различные клеи. Покрытия такого типа плохо проводят электрический ток или являются диэлектриками, поэтому они должны быть удалены из места контакта под действием усилия при сварке. Их выдавливание для обеспечения металлического контакта зависит от вязкости покрытия, шероховатости поверхности и скорости нарастания усилия сжатия. При предварительном нанесении этих покрытий сварку выполняют тогда, когда еще сохраняется их достаточно низкая вязкость. При применении в качестве наполнителей металлических порошков (цинка или алюминия) создание металлического контакта возможно при низкой вязкости покрытия. Для лучшего выдавливания покрытия увеличивают сварочное усилие на 10–20 % и снижают ток на 10–15 %. При сварке по покрытию происходит частичное их испарение, поэтому необходимо применение местной вытяжки и усиление общей вентиляции.

В штампосварных конструкциях применяют и клеесварные соединения. Клей одновременно повышает антикоррозионные свойства, придает герметичность точечным соединениям и существенно повышает их прочность, особенно при динамическом нагружении. Сварку выполняют по клею до его полимеризации. При сжатии электродами клей выдавливается из места сварки. Можно наносить клей и после сварки специальным шприцем. Под действием капиллярных сил покрытие проникает в зазор и надежно герметизирует его.

Сварка деталей малой толщины (0,01–0,6 мм) характеризуется незначительным усилием сжатия и относительно малой продолжительностью сварочного импульса. С уменьшением толщины снижается усилие сжатия, а контактные сопротивления возрастают, поэтому усиливается чувствительность процесса к состоянию поверхности детали. Стойкость электродов значительно снижается. Точечная сварка ведется на жестких режимах. Рабочая поверхность электродов сферическая.

**Сварка деталей большой толщины** (более 10 мм) затрудняется значительной жесткостью деталей, низкой стойкостью электродов при большой продолжительности импульса сварки. Для сварки используют мощные трехфазные машины. Циклы сварки применяют с повышением усилия сжатия и проковки и с модуляцией переднего фронта импульсов нагрева. Для снижения температуры нагрева электродов в целях повышения их стойкости применяют многоимпульсную сварку. Во время пауз электроды интенсивно охлаждаются вследствие более высокой теплопроводности их материала.

**Сварка пакета из трех и более деталей.** При сварке пакета необходимо иметь литое ядро, которое обеспечивает проплавление всех деталей вне зависимости от соотношения толщин (рис. 4.12). Режимы сварки применяют жесткие. Параметры режима подбирают по той толщине, которая находится в соприкосновении с электродами. В пределах соотношения толщин 1:3 качество сварки получается вполне удовлетворительным, однако стабильные результаты определяются хорошей подготовкой поверхности и сборкой с минимальными зазорами.

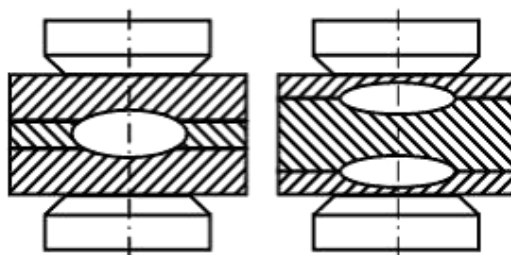


Рис. 4.12. Соединение пакета из трех деталей

**Точечная сварка на лицевых поверхностях.** При такой сварке стремятся снизить пластические деформации с одной стороны детали («бесследная» сварка), что достигается увеличением площади одного из электродов. Необходимая для сварки плотность тока создается другим электродом с нормальными размерами его рабочей поверхности. Режим сварки выбирают по возможности большей жесткости.

**Сварка деталей с закрытыми сечениями** выполняется с использованием косвенного токоподвода. Сварочный ток к месту сварки подводится с одной стороны через электрод с рабочей поверхностью нормальных размеров, а с другой — через деталь со смещенным контактом. В этих случаях необходима достаточная жесткость нижней детали, создающей опору. Параметры режима сварки для таких случаев подбирают экспериментально. Лучшие результаты дают более жесткие режимы.

### 4.3.5. Особенности технологии рельефной сварки

**Типы соединений.** При рельефной сварке по сравнению с точечной увеличивается производительность процесса, уменьшается размер нахлестки, улучшается внешний вид сварного соединения, повышается стойкость электродов, расширяется область применения контактной сварки. В ряде случаев рельефной сваркой заменяют менее экономичные способы сварки плавлением.

Рельефную сварку обычно применяют для соединения стальных деталей, реже — для соединения деталей из цветных металлов.

Наиболее широко распространена рельефная сварка нахлесточных соединений из листовых металлов с рельефами различной формы, полученными холодной штамповкой. Обычно используют круглый рельеф (рис. 4.13, *а*), обеспечивающий необходимую жесткость для восприятия сварочных усилий при нагреве. Нагрев и последующее формирование литого ядра точки в таком соединении происходят равномерно от периферии к центру. Инструмент для таких рельефов проще изготавливать и восстанавливать при ремонте. Для увеличения площади сварки, когда нельзя увеличить число круглых рельефов и размеры нахлестки ограничены, применяют рельефы продолговатой формы (рис. 4.13, *б*). Герметичное соединение обеспечивает кольцевой рельеф (рис. 4.13, *в*).

При изготовлении крепежных изделий рельефы получают холодной высадкой (рис. 4.13, *г, д*). Такие рельефы не имеют лунки и лучше воспринимают усилие сжатия при сварке. Возможно образование высаженных рельефов без лунки и на листе (рис. 4.13, *е*). Рельеф такого типа применяют при сварке деталей малых толщин и деталей из пластичных металлов и сплавов.

Особую группу составляют рельефы с острой гранью, применяемые для герметичных соединений. Это разновидность большой группы Т-образных соединений. Рельеф кольцевой формы в подобном соединении образуется между одной из внутренних кромок отверстий и наружной плоскостью детали, расположенной под углом к оси отверстия (рис. 4.13, *ж–к*). Другую группу Т-образных соединений, широко применяемых на практике, представляют изделия, в которых одна из деталей торцевой поверхностью приваривается к развитой поверхности другой детали (рис. 4.13, *л, м*).

Если одна из деталей представляет собой стержень, то их сварка происходит по всей поверхности торца. Необходимый рельеф может быть получен на конце стержня или в привариваемой плоскости. Такое же соединение возможно при сварке трубы и плоскости или двух труб, а также при сварке листов, в которых рельефы расположены на торце листа или выштампованы в плоскости детали (рис. 4.13, *н*).

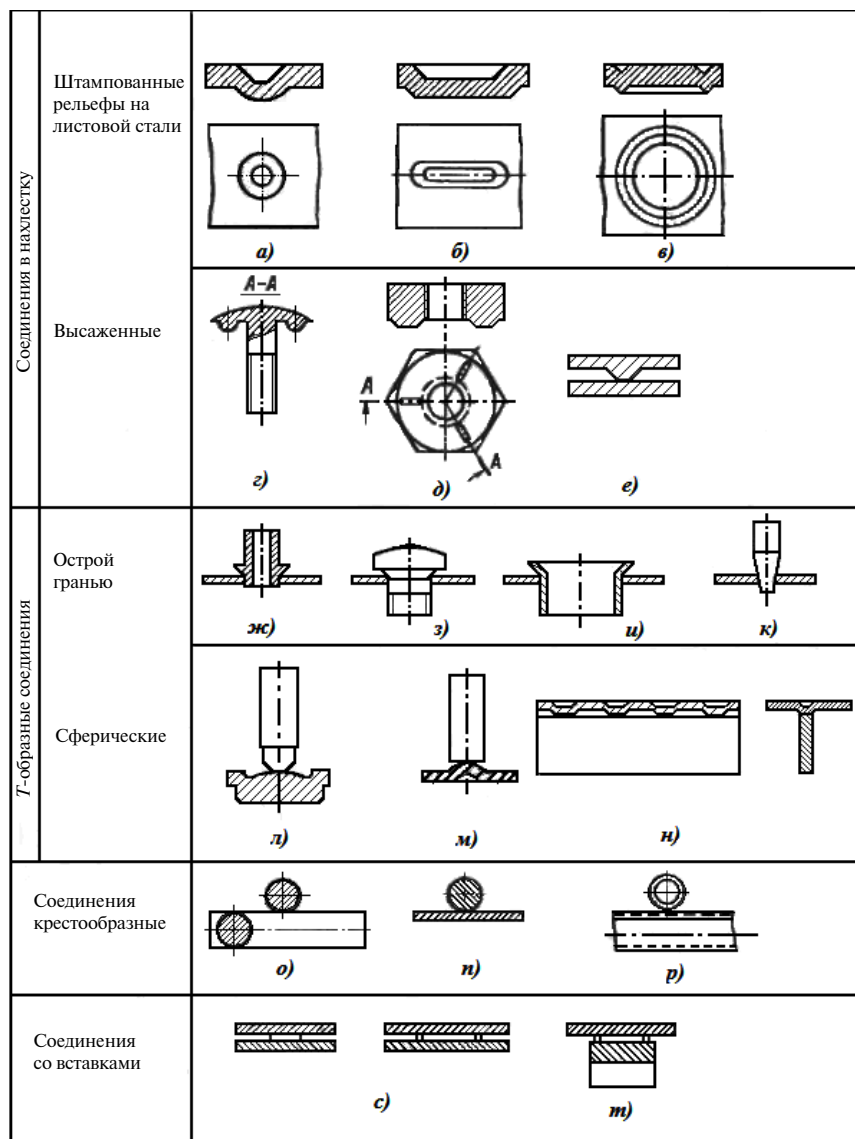


Рис. 4.13. Конструкции соединений рельефной сварки

К рельефным соединениям относятся крестообразные соединения проволоч, стержней или труб (рис. 4.13, *о–р*). Рельеф в этом соединении образуется естественной формой детали. Для увеличения жесткости в месте сварки трубы деформируют (рис. 4.13, *р*). Своеобразными рельефами являются вставки-концентраторы, расположенные между свариваемыми деталями в нахлесточных и Т-образных соединениях (рис. 4.13, *с, т*). Их применяют при сварке деталей большой толщины и в случаях, когда образование

рельефов штамповкой или высадкой затруднено. Вставка может легировать место сварки.

Соединения при рельефной сварке могут быть с расплавленным ядром и в твердом (пластическом без расплавления) состоянии. Соединения листовых металлов со штампованными рельефами обычно выполняют с литым ядром, хотя соединения этого типа при сварке в твердом состоянии имеют достаточно высокие прочностные показатели. Последнее объясняется интенсивной радиально направленной пластической деформацией места сварки.

**Параметры режимов разных соединений.** Диаметр  $d_p$  и высоту  $h_p$  круглых штампованных рельефов, наиболее часто встречающихся в практике, можно выбрать по таблицам или ориентировочно подсчитать, пользуясь следующими соотношениями в зависимости от толщины детали  $s$ :

$$d_p = 2s + 0,75; h_p = 0,4s + 0,25.$$

Диаметр литого ядра соединения  $d_{\text{я}} = (1,2-1,5) d_p$ . Если одновременно свариваются два рельефа и более, их высоту ограничивают небольшим допуском, иначе размеры литого ядра будут различны вследствие неравномерного распределения сварочного тока и усилия, а также влияния сил, возникающих между полями токов.

Для сварки тонколистовых низкоуглеродистых сталей плотность тока и давление, рассчитанные на минимальный диаметр литого ядра, в зависимости от жесткости режима колеблются соответственно в пределах 150–900 А/мм<sup>2</sup>, 60–130 МПа (табл. 4.10).

При сварке деталей разной толщины (в пределах 1:3) рельефы выдавливают в детали большей толщины, а режим устанавливают по меньшей толщине, что улучшает симметрию зоны проплавления. При большей разности толщин не всегда удастся добиться равномерного проплавления. В этом случае лучшие результаты получаются, если вместо штампованных рельефов применять промежуточную вставку-концентратор. При сварке много-рельефных соединений целесообразна модуляция переднего фронта импульса, уменьшающая вероятность начальных выплесков.

На практике широко используется сварка в крест арматуры железобетонных конструкций, различных сеток, решеток и других деталей. Сварка сопровождается значительной пластической деформацией металла стержней в процессе их совместной осадки. Соединение обычно формируется в твердом состоянии.

Рельефной сваркой чаще всего соединяют низкоуглеродистые и низколегированные стали. Увеличение площади контакта электрода с деталью приводит в ряде случаев к усиленному отводу теплоты, поэтому склонность к закалке повышается. При рельефной сварке также применяют термическую обработку в электродах машины. Такой цикл позволяет значительно повысить пластичность соединений и расширить область применения рельефной сварки.



Стали с различными легкоплавкими металлическими покрытиями хорошо свариваются рельефной сваркой, так как лучше сохраняется наружное покрытие вследствие меньшей плотности тока в месте касания массивных плоских электродов.

В электротехнической промышленности рельефной сваркой сваривают многослойные пакеты из трансформаторной стали. На каждой пластине штампуют круглый рельеф несколько увеличенного размера. При сборке рельеф в рельеф образуется кольцевой контакт. В результате сварки в зоне соединения формируется сплошная литая зона. При повышенном электрическом сопротивлении пакета требуется специальное сварочное оборудование с повышенным напряжением холостого хода.

Таблица 4.10

Режимы рельефной сварки низкоуглеродистой стали (на один рельеф)

Толщина детали $s$ , мм	Размер рельефа, мм		Минимальный диаметр литого ядра, мм	Режим сварки		
	диаметр $d_p$	высота $h_p$		Время импульса сварочного тока $t_{св}$ , с	Сварочное усилие $F_{св}$ , Н	Сварочный ток $I_{св}$ , кА
0,6	2,0	0,5	2,5	0,06	800	5,0
0,8	2,5	0,5	3,0	0,06	1100	6,6
1,0	3,0	0,7	4,0	0,16	1500	8,0
1,2	4,0	0,8	5,0	0,16	1800	8,8
1,5	5,0	0,9	6,0	0,20	2500	10,3
1,8	5,5	1,0	7,0	0,26	3000	11,3
2,0	5,5	1,0	7,0	0,28	3600	11,8
2,5	6,0	1,3	8,0	0,32	4600	14,0
3,0	7,0	1,5	9,0	0,38	6800	15,0
3,5	8,0	1,6	10,0	0,44	7500	15,3
4,0	9,0	1,7	11,0	0,50	8500	16,0

Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали хорошо свариваются всеми способами рельефной сварки.

Рельефная сварка алюминиевых сплавов осложняется низкой механической прочностью рельефов, образованных холодной штамповкой, и высо-

кими  $I_{св}$  и  $F_{св}$ , характерными для сварки алюминиевых сплавов. Даже при применении модулированных импульсов тока сварка сопровождается выплесками и подплавлениями на наружной поверхности деталей, а также быстрым изнашиванием электродов. Лучшие результаты получаются при высаженных рельефах без лунок с обратной стороны. Рельеф такой конструкции имеет большую жесткость. Сварка этих металлов возможна только на машинах с хорошими динамическими свойствами привода, допускающими сложное программное изменение усилия.

Рельефную сварку с высаженными рельефами без лунок с обратной стороны используют для создания контактов из серебра и его сплавов с бронзовыми, латунными или стальными контактодержателями.

#### 4.3.6. Особенности технологии шовной сварки

**Типы соединений.** Соединения при шовной сварке (рис. 4.14) разделяют на две группы: нахлесточные и стыковые. К нахлесточным относят соединения с простой нахлесткой, полуфланцевые и фланцевые (рис. 4.14, а–в). Все эти соединения сваривают отдельными точками с литым ядром. Точки перекрывают друг друга в герметичных швах. В этом случае размеры шва определяются размерами литого ядра точки. Для повышения производительности применяют шовную сварку нахлесточных соединений по рельефу (рис. 4.14, г).

В стыковом шве (рис. 4.14, д) с соединительной накладкой выполняются два параллельных нахлесточных шва. Из стыковых швов наиболее распространены соединения, свариваемые с раздавливанием кромок (рис. 4.14, е). Листы собирают с небольшой нахлесткой ( $1-1,5$ )  $s$  и сваривают на широких роликах. Благодаря большой пластической деформации сварка происходит в твердой фазе с небольшим (до 10 %) усилением по толщине.

Стыковые соединения с тонкими накладками ( $s_n = 0,14-0,4$  мм) в виде ленты из того же металла позволяют получить сварной герметичный шов с литым ядром и частичным проплавлением накладок (рис. 4.14, ж).

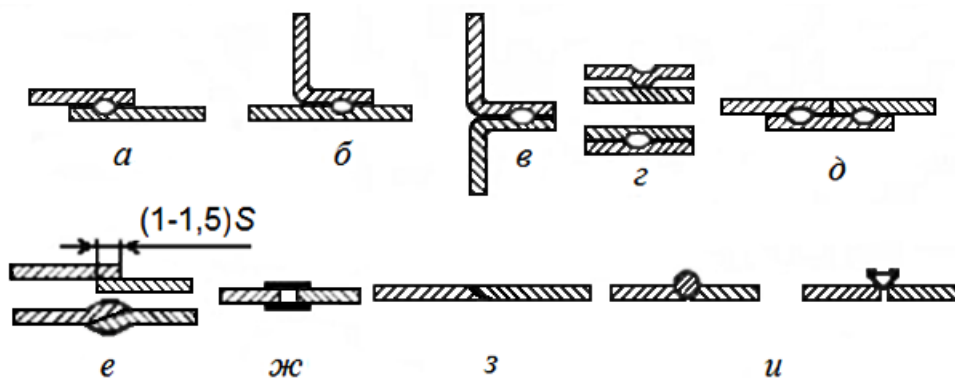


Рис. 4.14. Варианты конструкции соединений шовной сварки

Стыковое соединение можно получить, предварительно подготовив кромки свариваемых соединений на «ус» (рис. 4.14, з). Однако равнопрочности таких соединений с основным металлом достигнуть невозможно.

При необходимости стыковое соединение в твердой фазе с частичным расплавлением можно получить, используя присадочную проволоку круглого или треугольного сечения. Обычно проволоку применяют из того же материала, что и свариваемое изделие (рис. 4.14, и).

Торцевая сварка — особый случай шовной сварки, когда ролик слегка сдавливает торец, одновременно подводя сварочный ток. В области контакта электрод—деталь металл расплавляется. От растекания он удерживается силами поверхностного натяжения и образующейся оксидной пленкой.

**Параметры режимов сварки разных металлов и узлов.** Непрерывное включение тока используют только при сварке тонколистовых сталей. Силу сварочного тока при шовной сварке увеличивают на 20–60 % по сравнению с точечной из-за предпочтительности жесткого режима и, частично, из-за шунтирования. Усилия при шовной сварке также увеличивают по сравнению с точечной сваркой.

Важной характеристикой шовной сварки является соотношение между импульсами сварки  $t_{св}$  и временем цикла  $t_{ц}$ , оно обычно оценивается отношением  $t_{св}/t_{ц} = 0,15–0,85$ . При сварке сталей  $t_{св}/t_{ц} < 0,5$ , при сварке сталей с защитным легкоплавким покрытием  $t_{св}/t_{ц} = 0,8–0,85$ . Значительное увеличение  $t_{св}$  в цикле увеличивает зону разогрева. При сварке алюминиевых сплавов это отношение уменьшают до 0,3 для снижения шунтирования.

Для обеспечения герметичного шва точка перекрывает точку. Перекрывание литых зон в зависимости от толщин металла и требований герметичности должно составлять 20–60 %.

При сварке стальных деталей, даже при малом шаге, шунтирование через ранее сваренный участок не превышает 15–25 % из-за его нагрева и увеличения удельного сопротивления  $\rho$ . При сварке материалов с высокой температуропроводностью сварное соединение охлаждается быстрее, шунтирующий ток возрастает и последующая сварная точка становится несимметричной.

Режимы, применяемые на практике (табл. 4.11, 4.12) в зависимости от толщины и теплофизических свойств материала, обеспечивают шаг между точками в пределах 1,5–4,5 мм, а число точек — 2–7 на 10 мм шва.

Детали из разнородных материалов или разной толщины сваривают так же, как и при точечной сварке.

При сварке кольцевых швов роликами разного диаметра проплавление внутренней детали ухудшается вследствие увеличенного теплоотвода в нижний ролик, который соприкасается с деталью по большей площади. Однородного проплавления достигают путем уменьшения диаметра нижнего ролика. Некоторые детали имеют продольный и поперечный швы. В месте их пересечения образуется пакет из трех деталей.

Таблица 4.11

## Режимы шовной сварки низкоуглеродистых сталей

Толщина деталей, мм	Ток сварки, кА	Длительность, с		Усилие сжатия роликов, кН	Скорость сварки, м/мин
		импульса тока	паузы		
0,5	7,0–8,0	0,02–0,04	0,04–0,06	1,5–2,0	1,2–1,6
0,8	8,5–10,0	0,04–0,06	0,04–0,08	2,0–3,0	1,0–1,4
1	10,5–12,0	0,06–0,08	0,08–0,10	3,0–4,0	0,8–0,9
1,2	12,0–13,0	0,08–0,10	0,10–0,12	4,0–5,0	0,7–0,9
1,5	13,0–14,5	0,12–0,14	0,12–0,14	5,0–6,0	0,6–0,7
2	15,5–17,0	0,16–0,18	0,18–0,22	7,0–8,0	0,5–0,6
3	18,0–22,0	0,24–0,32	0,28–0,34	10,0–11,0	0,4–0,5

Таблица 4.12

## Режимы шовной сварки коррозионно-стойких сталей типа 12Х18Н9Т

Толщина деталей, мм	Ток сварки, кА	Длительность, с		Усилие сжатия роликов, кН	Скорость сварки, м/мин
		импульса тока	паузы		
0,3	4,5–6,0	0,02	0,04–0,06	2,0–2,5	0,8–1,4
0,5	5,0–7,0	0,02–0,04	0,06–0,08	3,0–3,5	0,6–1,3
0,8	7,0–9,0	0,04–0,06	0,08–0,12	4,0–5,0	0,5–1,0
1	9,0–11,0	0,06–0,08	0,12–0,16	5,0–6,5	0,5–0,8
1,2	10,0–12,0	0,06–0,08	0,14–0,18	6,0–7,0	0,5–0,8
1,5	11,5–13,0	0,08–0,10	0,16–0,20	7,0–9,0	0,4–0,7
2	12,0–16,0	0,12–0,16	0,24–0,32	10,0–13,0	0,3–0,6
2,5	13,0–17,0	0,16–0,20	0,32–0,40	11,0–14,0	0,3–0,5
3	14,0–18,0	0,20–0,30	0,60–0,70	13,0–16,0	0,2–0,4

Увеличение суммарной толщины и образование зазора ухудшают качество в этом месте. Продольный шов в таких деталях лучше выполнять стыковым (см. рис. 4.14, *е*) или в углу обечайки делать прямоугольный вырез. После шовной сварки продольного нахлесточного шва приваривается доннышко кольцевым швом. В последнюю очередь сваривается участок пересечения швов дуговой или газовой сваркой.

### 4.3.7. Особенности технологии стыковой сварки

Стыковую сварку широко используют в промышленности для изготовления длинномерных изделий из проката (рис. 4.15, *а*), сложных деталей из простых заготовок и деталей замкнутой формы (рис. 4.15, *б*, *в*) в целях экономии легированных сталей (режущий инструмент, клапаны двигателей и др.).

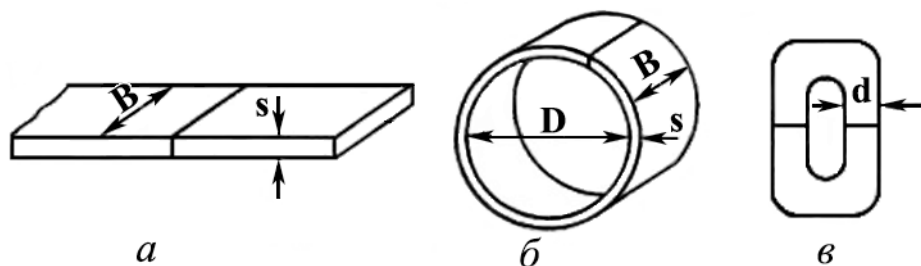


Рис. 4.15. Примеры типовых соединений, получаемых стыковой сваркой

Способ стыковой сварки выбирается в зависимости от формы и сечения деталей, марки металла, требований к качеству соединений.

Сваркой сопротивлением обычно соединяют детали небольшого, как правило круглого, сечения (не более  $200 \text{ мм}^2$ ) из низкоуглеродистых сталей (рис. 4.16, а), а также алюминия и меди (до  $100 \text{ мм}^2$ ). Детали большего сечения сваривают по схеме принудительного формирования или в среде защитных газов.



Рис. 4.16. Стыковая сварка стержней: а — сопротивлением; б — оплавлением

Наиболее широко применяют сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Сварка оплавлением обеспечивает высокое качество соединений при меньших затратах электрической мощности и трудоемкости на досварочные операции.

Непрерывным оплавлением сваривают детали с компактным сечением до  $1000 \text{ мм}^2$  (из низкоуглеродистой стали) (рис. 4.16, б) и детали несколько большего сечения с развитым периметром (трубы, листы и др.).

Область рационального применения сварки оплавлением с подогревом сопротивлением ограничивается сечениями  $500\text{--}10000 \text{ мм}^2$ . При больших сечениях неравномерность нагрева по сечению приводит к снижению стабильности качества соединений. Кроме того, резко возрастает необходимая мощность оборудования.

Детали с площадью сечения  $5000\text{--}40000 \text{ мм}^2$  сваривают непрерывным оплавлением на машинах с программным управлением напряжением сварочного трансформатора и скоростью подачи подвижного зажима.

Высокой эффективностью обладает способ стыковой сварки импульсным оплавлением, который позволяет сваривать стальные заготовки сечением до  $200\,000\text{ мм}^2$  и получать качественные соединения из различных трудносвариваемых металлов.

Торцы деталей, подлежащие стыковой сварке, должны быть рационально сконструированы (рис. 4.17).

Во-первых, необходимо создать условия для равномерного нагрева и, по возможности, одинаковой пластической деформации при осадке.

Во-вторых (особенно при сварке сопротивлением), обеспечить защиту торцов от окисления и облегчить вытеснение окисленного металла из рабочей зоны шва.

В-третьих, форма деталей должна обеспечить надежное закрепление их в зажимах сварочной машины и токоподвод вблизи зоны сварки. Форму и размеры сечения торцов заготовок следует выполнять примерно одинаковыми. Различие в диаметрах не должно превышать 15 %, а по толщине — 10 %.

Подготовка деталей к сварке заключается в получении определенной формы торцов, очистке их поверхности и поверхности деталей, правильной установке торцов перед началом сварки. Торцы деталей получают механической резкой на ножницах, пилах, металлорежущих станках, горячей или холодной высадкой на прессах, а также с помощью плазменной и газовой резки с последующим удалением шлака. Токоподводящие участки деталей и торцов очищают различными механическими способами и травлением.

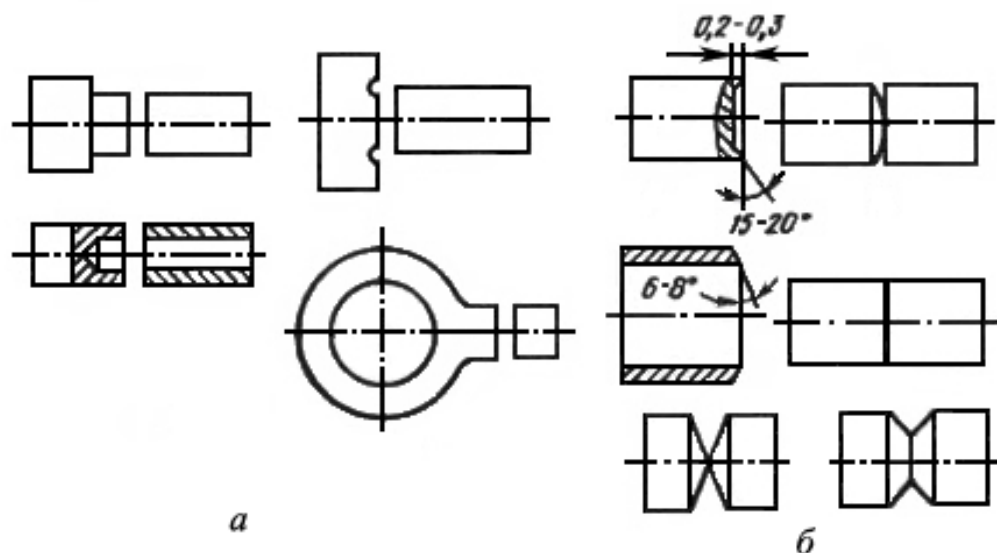


Рис. 4.17. Рациональная конструкция соединений для стыковой сварки:

*а* — оплавлением; *б* — сопротивлением

При сварке сопротивлением (вследствие трудности обновления поверхности) требуется более тщательная установка деталей при сборке, чем при сварке оплавлением. Так, зазор между торцами при сварке сопротивлением не допускается более 0,5 мм.

При сварке оплавлением он может быть большим (до 15 %  $\Delta_{\text{опл}}$ ). При сварке развитых сечений требования к качеству сборки, в частности к взаимной параллельности торцевых поверхностей деталей, ужесточаются.

Режимы назначают по металлам и толщине. Металлы обычно разбивают на несколько групп: низкоуглеродистые, среднеуглеродистые и низколегированные стали, легированные стали, титановые сплавы, легкие металлы и др.

Низкоуглеродистая сталь хорошо сваривается стыковой сваркой, и сварные соединения по прочностным показателям близки к исходному металлу.

В связи с невысокой прочностью соединений (трудности удаления оксидов), необходимостью применения повышенной электрической мощности (высокая средняя плотность тока) и большими затратами труда на подготовку торцов сварка сопротивлением имеет относительно ограниченное применение. Ориентировочные режимы стыковой сварки сопротивлением приведены в табл. 4.13.

Наиболее широко применяют сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Сварка оплавлением обеспечивает высокое качество соединений при меньших затратах электрической мощности и трудоемкости подготовительных операций. Ориентировочные режимы стыковой сварки оплавлением приведены в табл. 4.14.

При сварке среднеуглеродистых и низколегированных сталей в зоне сварки снижается пластичность металла в результате появления закалочных структур. Некоторые стали этой группы склонны к образованию рыхлотов в околошовной зоне вследствие частичного расплавления. При необходимости пластичность повышают подогревом, регулируемым охлаждением или последующей термической обработкой. Давление осадки по сравнению с низкоуглеродистыми сталями увеличивают до 50 %.

При сварке высокоуглеродистых сталей интенсивное выделение оксида углерода улучшает защиту оплавленных торцов от окисления, поэтому скорости оплавления и осадки могут быть умеренными. Пластичность соединения еще больше снижается, поэтому необходимо применять сварку с подогревом и последующую термообработку — отпуск. В околошовной зоне могут появиться усадочные рыхлоты из-за частичного расплавления, поэтому для их предотвращения необходимо использовать более жесткие режимы сварки, уменьшая глубину прогрева, и повышать давление осадки до 120 МПа.

При сварке углеродистых перлитных сталей в стыке образуется ферритная полоска. В этом месте снижается твердость, в основном вследствие выгорания углерода и ликвации элементов. Для повышения твердости в этом месте увеличивают  $F_{\text{ос}}$ .

Аустенитные стали хорошо свариваются при условии интенсивного оплавления ( $V_{\text{опл}} > 5\text{--}6$  мм/с) перед осадкой и большой скорости осадки ( $V_{\text{ос}} > 50$  мм/с), что предотвращает образование тугоплавких оксидов хрома, удаление которых при осадке затруднено.

Таблица 4.13

Режимы стыковой сварки сопротивлением стержней  
из углеродистой стали

Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Установочная длина, мм	Давление осадки, кгс/мм <sup>2</sup>	Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Длительность тока, с	Припуск на осадку, мм
10	6	2–4	250	0,3	2
25	8	2–4	200	0,6	2,5
50	10	1–3	160	0,8	2,7
100	12	1–3	140	1	3
250	16	1–3	100	1,5	4
500	24	1–2	60	2,5	6

Примечания: 1. Припуск на осадку под током составляет 60–70 % общего припуска.

2. Установочная длина дана на обе детали.

Такие стали лучше сохраняют прочность при нагреве, поэтому давление осадки должно быть в 2–3 раза выше, чем при сварке низкоуглеродистой стали. Различные марки чугунов обычно хорошо свариваются при умеренных скоростях оплавления и осадки, что достигается высоким содержанием углерода, обеспечивающего хорошую защиту зоны сварки. Чугун сваривают с подогревом и последующей термической обработкой.

При сварке алюминия и его сплавов необходимы высокая скорость оплавления (до 20 мм/с) и большие скорости осадки ( $> 150$  мм/с). Это предотвращает образование тугоплавкого оксида алюминия. Для обеспечения высоких скоростей оплавления плотность тока перед осадкой достигает 40–60 А/мм<sup>2</sup>.

Алюминиевые сплавы обычно сваривают с принудительным формированием стыка и одновременным срезанием грата или с принудительным формированием стыка без срезания грата. Давление осадки в первом случае составляет 150–300 МПа, при использовании только принудительного формирования — до 500 МПа. При свободной осадке часто образуются расслоения и рыхлости, для устранения которых применяют формирующие губки. Упрочняемые сплавы сваривают с возможным кратковременным нагревом, неупрочняемые можно сваривать с более длительным нагревом при скорости оплавления до 15 мм/с. Детали большого сечения сваривают с подогревом при увеличенной установочной длине.



Таблица 4.14

**Режимы стыковой сварки оплавлением низкоуглеродистой стали  
(припуски даны на две детали)**

Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Припуск при сварке непрерывным оплавлением, мм			Припуск при сварке оплавлением с подогревом, мм	
	на оплавление	на осадку	на подогрев	на оплавление	на осадку
75	5–5,5	2–3	2,5	4,5	3,5
100	5,5–6,5	2,4–3	3	5	3,5
200	7–7,5	3–3,5	4	5,5	3,5
300	9–10	3,5–4	4	7	4
600	11–12,5	4–4,5	4	7	4
1000	14–17,5	4,5–5,5	4	10	4
1250	17–20	5–5,5	4	11	4
1500	18–22	5,5–6,5	4,5	11,5	4,5
2000	20–25	6–6,5	5	12	5

*Примечание.* Плотность тока при оплавлении 10–15 А/мм<sup>2</sup>, при осадке 20–0 А/мм<sup>2</sup>. Давление осадки при сварке оплавлением 6–10 кгс/мм<sup>2</sup>, при сварке оплавлением с подогревом — 4–6 кгс/мм<sup>2</sup>. Скорость осадки 50–70 мм/с. Установочная длина одной детали равна (0,7–0,9)  $d$ , где  $d$  — диаметр стержней.

Медь вследствие высокой теплопроводности, электропроводимости и температуры плавления сваривается значительно хуже алюминия. Ряд сплавов на медной основе сваривается несколько лучше. Процесс оплавления меди ведут на высоких скоростях (до 20 мм/с). Осадка осуществляется со скоростью 200 мм/с при давлении 400–950 МПа. При сварке латуни вследствие опасности выгорания цинка процесс оплавления ведут также на больших скоростях. Вначале скорость оплавления составляет 0,7–1,0 мм/с, в конце — до 15 мм/с. Скорость осадки 200–300 мм/с, давление осадки 250 МПа. Детали из меди и латуни небольших сечений часто предпочитают соединять сваркой сопротивлением.

Титан и его сплавы при высокой интенсивности оплавления сваривают без газовой защиты. При сварке в защитной среде из аргона или гелия используют режимы, близкие к режимам сварки сталей. Большинство сплавов титана после сварки подвергают термической обработке.

Тугоплавкие металлы — молибден, цирконий, ниобий и тантал — вследствие высокой температуры плавления и активного взаимодействия с кислородом, азотом и водородом сваривают в защитных камерах с нейтральным

газом при отсосе образующихся соединений. При кратковременном нагреве ниобий и молибден можно сваривать без защитной среды.

Остаточные деформации при стыковой сварке менее выражены, чем при точечной и шовной сварке, так как соединение происходит по всему сечению и остаточные деформации сосредоточиваются в месте стыка, образуя равномерное усиление по всему сечению.

При нарушении правильности установки электродов, наличии больших зазоров в направляющих подвижного стола, недостаточной жесткости станины машины, а также слабом зажатии детали зажимами возможно несоответствие сечения свариваемых деталей или искажение их оси.

Если требуется высокая точность при сварке, то изделие подвергают последующей механической обработке, для которой предусматривается соответствующий припуск.

### **Технология сварки разных изделий**

*Сварка заготовок инструмента* обеспечивает экономию качественных инструментальных сталей. Из нее делают рабочую часть инструмента, а хвостовую часть — из дешевой углеродистой стали. Сварку выполняют оплавлением или оплавлением с подогревом. Технология сварки определяется в основном свойствами инструментальных сталей. Низкие теплопроводность и электропроводимость инструментальной стали компенсируются при сварке большей (на 30–50 %) установочной длиной заготовки из углеродистой стали. Вероятность образования трещин из-за образования закалочных структур снижают применением замедленного охлаждения после сварки и последующего отжига. Чувствительность стали к перегреву с образованием участков хрупкой структуры предупреждается удалением перегретого металла путем повышения давления осадки. Параметры режима сварки и последующей термообработки уточняют в зависимости от свойств используемой инструментальной стали.

*Сварка кольцевых деталей* затруднена из-за шунтирования тока и действия сил, возникающих вследствие упругой деформации кольца при осадке. Оба фактора вызывают необходимость использования более мощного оборудования, чем при сварке разомкнутых деталей. Потребляемая мощность из-за шунтирования возрастает на 15–50 %, резко увеличивается усилие зажатия концов кольца. Для облегчения деформации при сварке и снижения тока шунтирования кольцо до сварки подогревают в зажимах машины. Иногда для увеличения индуктивного сопротивления на кольцо надевают разъемный магнитопровод. Кольцевые детали в зависимости от сечения сваривают непрерывным оплавлением, оплавлением с подогревом, импульсным оплавлением. Общая схема технологического процесса сварки кольцевых деталей состоит из следующих последовательно выполняемых операций: вальцовка заготовки, зачистка концов, подгибка концов (для надежного закрепления в зажимах), сварка, удаление грата, растяжка.

*Сварка рельсов* может выполняться как в стационарных условиях — в цехе, так и мобильными установками — в пути. Нормальные железнодорожные рельсы имеют сечение 5000–8000 мм<sup>2</sup> и прокатываются из стали, содержащей до 0,9 % С. При сварке рельсы зажимаются плоскими электродами на длине 150–200 мм с двусторонним подводом тока. Сложность сварки рельсов обусловлена их конфигурацией, что затрудняет равномерный нагрев торцов и деформацию металла. Качество сварки повышают за счет интенсификации оплавления перед осадкой. Для этого обычно увеличивают  $V_{\text{опл}}$  до 0,9–1,2 мм/с. Для улучшения свойств сварных соединений после сварки проводят нормализацию или отпуск.

*Сварка труб* применяется в котлостроении, при изготовлении нефтяного оборудования, при строительстве магистральных и промышленных трубопроводов и т. д. При сварке труб требуется точное совпадение свариваемых кромок, как правило, обеспечение проходного отверстия не менее 80–90 % внутреннего диаметра трубы и равномерный подвод тока по периметру.

Трубы диаметром до 60–100 мм сваривают непрерывным оплавлением или оплавлением с подогревом. В зависимости от жесткости трубы применяют электроды с цилиндрической и призматической поверхностью.

Магистральные трубопроводы больших диаметров (700–1450 мм) сваривают непрерывным оплавлением с программным изменением напряжения и скорости сближения торцов. Для сварки применяют установки, оснащенные кольцевыми или блочными трансформаторами, обеспечивающими равномерный подвод тока по периметру трубы. При этом резко снижается сопротивление сварочного контура (до 12–15 мкОм), и устойчивое оплавление идет при малой удельной мощности (0,015–0,025 кВА/мм<sup>2</sup>). Давление осадки обычно составляет 50 МПа,  $V_{\text{опл.ср}} = 1$  мм/с. Для облегчения возбуждения оплавления кромки труб скашиваются под небольшим углом.

## 5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

---

### 5.1. Методы устранения дефектов сварки

---

Качество соединений, выполненных контактной сваркой, определяется в основном наличием сплошной металлической связи по заданной площади соединения.

При точечной, шовной и в большинстве случаев при рельефной сварке эта площадь оценивается размерами зоны взаимного расплавления деталей. При стыковой сварке металлическая связь должна быть установлена по всей площади торцов соединяемых деталей. Невыполнение этих требований влечет образование непроваров. Непровары, несплошности (трещины, раковины), выплески, недопустимые изменения свойств металла, а также несоблюдение установленного внешнего вида, формы и расположения швов квалифицируются как дефекты.

Используемые в настоящее время технологии и сварочное оборудование не гарантируют полного отсутствия дефектов в сварных соединениях. Возникновение дефектов может быть связано с воздействием на процесс сварки различного рода возмущений.

Различают два вида возмущений: от произвольных отклонений технологических факторов (величины сборочных зазоров, размеры рабочей поверхности электродов, показатели качества подготовки поверхности деталей, ненадежное закрепление деталей в зажимах стыковой машины и т. п.), а также от произвольных колебаний электрических и механических параметров сварочного оборудования в процессе сварки.

При точечной, шовной и рельефной сварке непровары в ряде случаев удается обнаружить в процессе внешнего осмотра. Но в некоторых случаях даже использование радиационных методов контроля, например просвечивание рентгеновскими лучами, не обеспечивает выявление непроваров. Если при этих способах сварки по каким-либо причинам не предусмотрено взаимное расплавление деталей, установить качество сварки не представляется возможным. В таких случаях методы контроля должны оговариваться специальными техническими условиями. Исправляют непровар повторной постановкой точек или подваркой дуговой сваркой после разделки дефектной части шва.

Наружные или внутренние дефекты зоны сварки, такие как выплески, трещины, раковины, поры, обнаруживают, используя следующие методы контроля: внешний осмотр, ультразвуковой или рентгеновский методы.

Устраняют дефекты дуговой сваркой после разделки дефектного участка шва.

Дефекты структуры (охрупчивание, перегрев) как при точечной, так и при стыковой сварке обнаруживают внешним осмотром (по цветам побежалости) или измеряя твердость. Эти дефекты в отдельных случаях удастся устранить локальной (в электродах машины) или общей термообработкой узла.

При стыковой сварке внутренние дефекты (непровары, неметаллические включения, трещины, раковины) обнаруживают внешним осмотром, ультразвуковым, электромагнитным и рентгеновским методами контроля. Однако методы надежного определения непровара отсутствуют. Устраняются дефекты дуговой сваркой.

К дефектам следует относить также различные отклонения геометрических параметров сварного соединения (глубокие вмятины от электродов, неправильная форма шва, отсутствие соосности свариваемых деталей и др.). Основной причиной их образования следует считать нарушение технологии и техники выполнения сварки. Эти дефекты обнаруживают внешним осмотром и инструментальным контролем.

На качество деталей и стойкость электродов при точечной и шовной сварке большое влияние оказывают процессы взаимного переноса частиц свариваемого металла и электрода. Их активность при сварке постепенно возрастает и достигает критического значения после сварки определенного числа точек. Установить этот предел визуально не представляется возможным. Накопление продуктов взаимодействия сопровождается увеличением электрического сопротивления и падением напряжения в контакте электрод—деталь при сварке от точки к точке. Значение падения напряжения используют в качестве объективного признака, характеризующего состояние контакта.

Количество дефектов, допускаемых без исправления и подлежащих исправлению, зависит от ответственности сварного узла и регламентируется соответствующими техническими условиями.

## 5.2. Контроль сварных соединений

---

Контроль сварных соединений заключается в качественной или количественной оценке основных признаков, характеризующих их работоспособность. Контроль осуществляют с разрушением и без разрушения соединений.

Контроль с разрушением проводят путем испытания технологических образцов (образцов-свидетелей) и выборочных испытаний сварных конструкций. Этот способ контроля дает практически лишь консультативную информацию, информацию по аналогии, так как качество не разрушенных соединений в изделиях остается неизвестным. В то же время простота и наглядность результатов послужили причиной широкого применения контроля с разрушением, особенно контроля технологических образцов в промышленности (рис. 5.1).

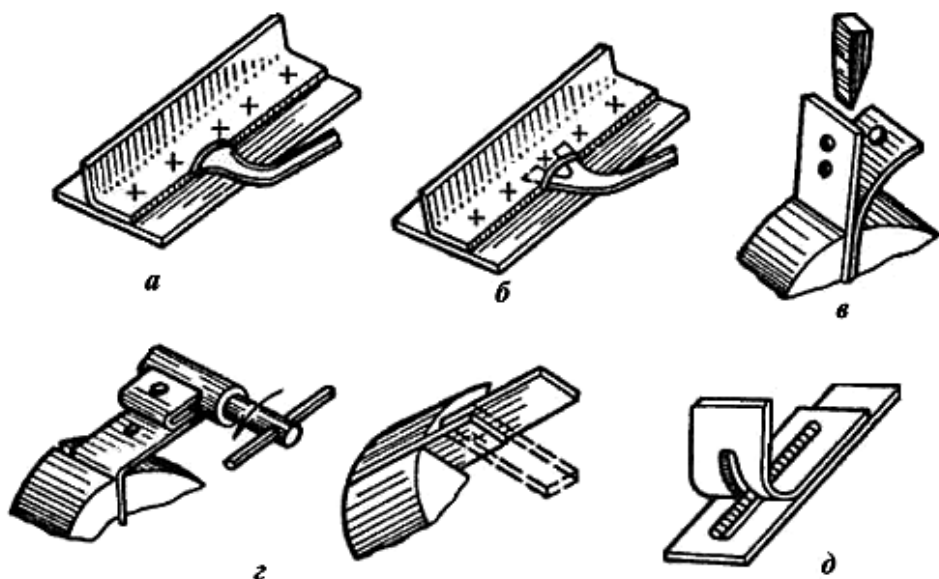


Рис.5.1. Контроль с разрушением методом технологических проб:  
*а, б* — испытания на разрыв образцов, полученных точечной сваркой; *в* — испытания на срез образцов, полученных точечной сваркой; *г* — испытание на кручение образцов, полученных точечной сваркой; *д* — испытание на разрыв образцов, полученных шовной сваркой

Подбор режима сварки, проверку качества соединения в процессе сварки, а также проверку стабильности работы сварочного оборудования ведут по результатам испытаний технологических образцов. Технологические образцы должны соответствовать свариваемым деталям по марке металла, состоянию поверхности, сочетанию толщин или сечению, шагу сварных точек, а в отдельных случаях — и по форме узла. По результатам испытаний технологических образцов (если не требуются данные по другим видам контроля) дается разрешение на сварку или приемку готового изделия, а также заключение о пригодности к эксплуатации сварочного оборудования.

Для определения качества сварных соединений в конструкции иногда практикуется выборочное разрушение определенного количества готовых изделий из партии. Виды испытаний сварных соединений зависят от конфигурации и назначения изделия и определяются специальной программой (рис. 5.2, *а*).

Неразрушающий контроль — наиболее перспективный при дефектоскопии сварных соединений. При контроле без разрушения применяют в первую очередь следующие методы физического контроля: радиационный, электро-

магнитный и ультразвуковой. К неразрушающим методам следует отнести также визуально-измерительный контроль (внешним осмотром), контроль на герметичность и сопротивление соединений заданным нагрузкам (рис. 5.2, б).

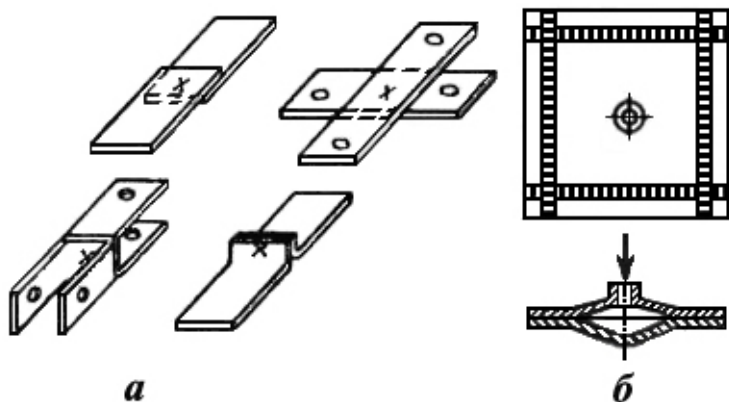


Рис. 5.2. Разновидности образцов для механических испытаний: а — образцы для испытаний на разрывной машине; б — образец для гидроиспытаний на прочность и герметичность соединений, полученных шовной сваркой

Наиболее простой способ неразрушающего контроля — визуально-измерительный контроль соединений невооруженным глазом или с помощью лупы 7–10-кратного увеличения. При точечной, рельефной и шовной сварке проверяют расположение точек и швов в соответствии с чертежом, форму, размеры вмятин от электродов, наличие наружных дефектов (трещины, выплески, иногда непровары) и продуктов массопереноса, зазоры между деталями и деформацию узла. При стыковой сварке внешним осмотром или обмером выявляют дефекты геометрической формы (перекосы, смещения, укорочения), подгар поверхности, трещины, пережог металла стыка. Иногда внешний осмотр позволяет обнаружить внешние трещины, непровары и структуру шва после удаления высаженного металла и грата, полирования и травления поверхности. В соединениях из легированных сталей измеряют твердость шва.

При необходимости швы сварных конструкций проверяют на герметичность: в открытых конструкциях — керосино-меловой пробой, в закрытых сосудах — сжатым воздухом в водяной ванне, аммиаком с индикаторной бумагой, гелиевыми или фреоновыми течеискателями и другими известными методами.

К методам неразрушающего контроля следует отнести также испытания соединений нагружением иногда до расчетных или несколько превышающих этот уровень значений. Изделия, выдержавшие эти испытания, считаются годными. Этот метод испытаний нашел широкое применение при изготовлении радиоэлектронных приборов, у которых проверяют электрические

и механические параметры. Емкости ответственного назначения, кроме испытания на герметичность, испытывают на сопротивление расчетным вибрационным и ударным нагрузкам.

В некоторых случаях подобные или близкие к расчетным значениям нагружения составляют неотъемлемую часть технологического процесса производства изделий. Так, например, сваренные стыковой сваркой ободья колес испытывают раздачей их на экспандере, кольцевые заготовки шпангоутов после сварки подвергают правке с растяжкой, соединения из полос проверяют последующей прокаткой до заданной формы. При испытании нагружением целесообразно одновременно контролировать зону сварки, например, методом акустической эмиссии в целях получения информации о появлении недопустимых дефектов.

Радиационный контроль с использованием рентгеновского излучения — один из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля соединений при контактной сварке. Этим способом хорошо выявляются несплошности (трещины, раковины, скопление оксидов, поры, выплески и другие подобные дефекты), но в общем случае не выявляются непровары, при которых, как правило, несплошность отсутствует. Тем не менее иногда при точечной, шовной и рельефной сварке можно, используя рентгеноконтрастность границы шва, по рентгенограмме определять размеры зоны взаимного расплавления деталей и, таким образом, объективно диагностировать наличие и отсутствие непроваров.

Для выявления несплошностей в соединениях, выполненных стыковой сваркой, иногда наряду с рентгеновским используют и гамма-излучение. Схемы просвечивания выбирают в зависимости от конструкции узла, физических параметров и толщины свариваемых металлов (рис. 5.3). При сварке толстостенных заготовок, в том числе и трубных, целесообразна схема с установкой источника излучения под некоторым углом к оси шва.

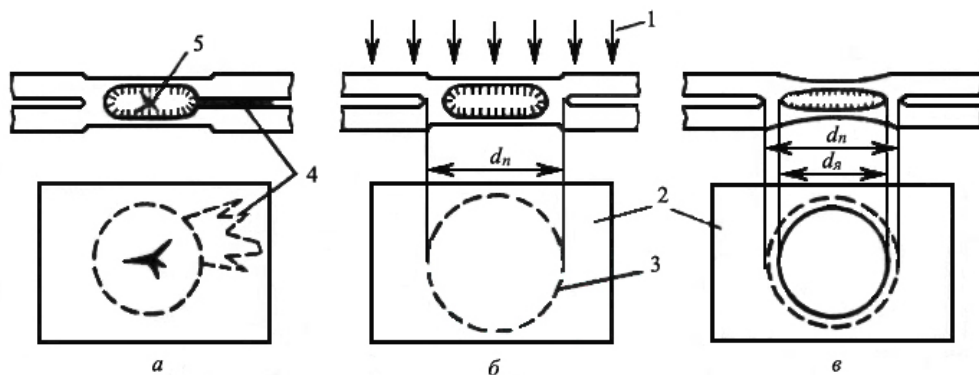


Рис. 5.3 Схема радиационного контроля с использованием рентгеновского излучения: 1 — рентгеновские лучи; 2 — рентгенограмма; 3 — отпечаток пояски; 4 — выплеск; 5 — трещина



Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых колебаний (УЗК) распространяться в металле в виде направленных волн на большие расстояния и отражаться от участка разной плотности, например дефектов, при условии, если их размеры по толщине больше длины ультразвуковой волны (рис. 5.4). Современные дефектоскопы в основном работают с частотой распространения упругих колебаний в диапазоне частот 0,5–25 МГц и способны четко обнаруживать дефекты размером не менее 10 мкм.

Ультразвуковой контроль позволяет в общем случае определять следующие дефекты соединений, выполненных контактной сваркой: раковины, трещины, поры, выплески, а также локальные скопления оксидов (последний дефект характерен для стыковой сварки оплавлением). Выявление этих дефектов проводится обычными методами ультразвуковой дефектоскопии. Наиболее опасный дефект — непровар — вследствие отсутствия при этом несплошностей и малой толщины поверхностных оксидов ультразвуковым методом контроля не выявляется.

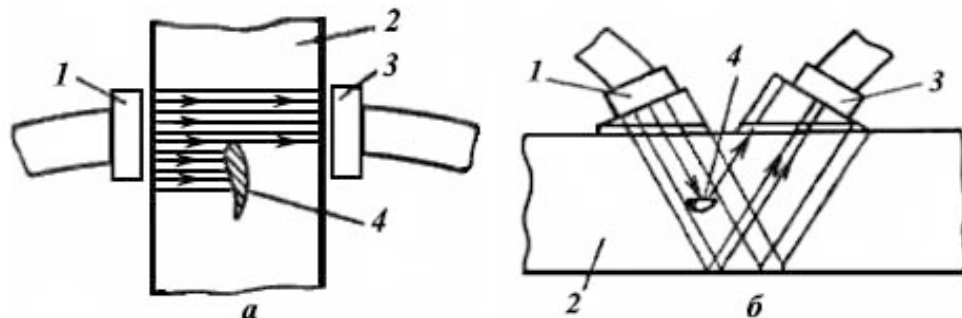


Рис. 5.4. Схема ультразвукового контроля: *а* — теневым методом; *б* — эхоимпульсным методом; 1 — щуп-излучатель; 2 — деталь; 3 — щуп-приемник; 4 — дефект

Магнитные методы контроля могут быть использованы главным образом при дефектоскопии соединений, выполненных из ферромагнитных материалов стыковой сваркой (рис. 5.5). Хорошо обнаруживаются поверхностные дефекты или несплошности (раковины, трещины, поры) на глубине не более 10–15 мм. Однако следует учитывать, что магнитный рисунок на поверхности контролируемого изделия может изменяться в зависимости не только от дефектов, но и от локальной структурной или магнитной неоднородности металла, а также от геометрии сварного шва, что может быть причиной ложной расшифровки получаемого изображения. При точечной сварке сталей в ряде случаев кроме дефектов несплошности удастся фиксировать наружные границы пояска.

Электромагнитный метод контроля, или метод вихревых токов, используют для определения размеров литого ядра при точечной сварке соединений на деталях как из магнитных, так и слабомагнитных сплавов, например

из стали 08кп, сплавов АМгб, Д16, ОТ 4–1. При контроле переменное магнитное поле накладного преобразователя возбуждает в зоне сварки вихревые токи, величина которых зависит от локальной электропроводимости — размеров литого ядра. При отсутствии литого ядра она максимальна и соответствует полному непровару. С увеличением литого ядра до номинального значения она снижается на 12–15 %.

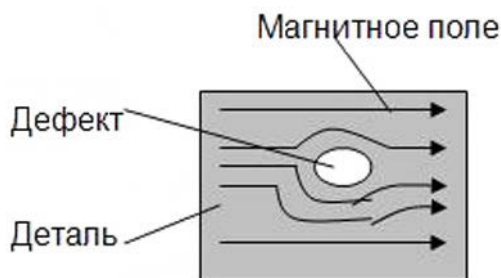


Рис. 5.5. Принципиальная схема электромагнитного метода контроля

Контроль параметров режима в процессе сварки выполняется в целях обеспечения стабильной работы сварочного оборудования. Задача решается путем создания специальной аппаратуры периодического и непрерывного измерения, а также автоматической стабилизации основных параметров режима сварки. Сложность организации этого контроля объясняется кратковременностью процесса сварки, большой производительностью работы оборудования, импульсным характером электрических параметров, недоступностью наблюдения за формирующейся зоной соединения и другими факторами.

### 5.3. Организация контроля и его место в технологическом процессе

Для предупреждения образования дефектов и их своевременного обнаружения организуют контроль всех звеньев производства сварных узлов, начиная со стадии проектирования сварной конструкции, затем сопутствующих сварке операций, собственно процесса сварки и готовых узлов, а также проводят систематическую паспортизацию оборудования и проверку квалификации наладчиков и сварщиков. В зависимости от способа сварки, организации производства, ответственности конструкций и других особенностей выбирают различные способы контроля и последовательность их выполнения. Методы контроля качества направлены на предупреждение всех указанных выше дефектов в соединениях, а также на выявление возникших дефектов. Однако главным их назначением применительно к условиям контактной сварки является диагностирование и предупреждение непроваров, так как

остальные дефекты сравнительно легко обнаруживаются общеизвестными методами дефектоскопии.

Технологический контроль чертежей — первый и важнейший этап контроля; он способствует созданию технологичной конструкции сварного узла в стадии его проектирования и выполняется наиболее квалифицированными технологами-сварщиками. На этом этапе проверяется правильность выбранного сочетания толщин и марок металла, размещение сварных швов и выбор размеров сварных соединений, возможность свободного подхода к месту сварки рабочими элементами машины, возможность контроля сварных швов, а также механизации и автоматизации процессов сварки и контроля. Контроль операций, сопутствующих точечной и шовной сварке, включает проверку:

- марки металла и его технологического состояния;
- качества поверхности деталей;
- размеров входящих деталей;
- размеров и расположения прихваток;
- базовых размеров сборочных и прихваточных приспособлений;
- качества сборки;
- узла после сборки и прихватки;
- качества антикоррозионных покрытий, правильности их размещения и времени нанесения под нахлестку;
- марки металла электродов;
- формы рабочей поверхности и условий охлаждения электродов.

Во время сборки, прихватки и сварки часто образуются упругие зазоры. Если они больше установленного допуска, можно ожидать дефектов в виде непроваров и выплесков.

Статистический контроль является способом статистической обработки результатов, полученных другими методами контроля. В условиях контактной сварки этот контроль может быть использован как при операциях промежуточного контроля (для оценки качества работы оборудования, правильности подобранного режима сварки, качества подготовки поверхности), так и при окончательном контроле. Для суждения о качестве процесса, стабильности результатов сварки показатели качества, полученные по отобранной пробе, немедленно обрабатывают и предъявляют контролерам и наладчикам. Распространенная и удобная форма записи результатов обработки испытаний проб — точечные графики, вывешиваемые на видном месте на соответствующих позициях контроля. Методы статистического контроля позволяют оценить достоверность контроля, а также установить оптимальный объем выборки для контроля соединений.

Современное производство, как правило, характеризуется большим объемом работ, связанных с контролем. Трудоемкость контроля становится сопоставимой с трудоемкостью процесса изготовления изделий. В связи с этим

возникает необходимость резкого увеличения производительности контроля без ущерба для качества соединений. Это достигается путем механизации и автоматизации ручных контрольных операций, создания систем автоматического, пассивного и активного контроля в процессе сварки (сопутствующий контроль) по параметрам, обладающим наибольшей связью с качеством сварки. При пассивном контроле соответствующая аппаратура констатирует лишь качество сварки, не вмешиваясь в процесс сварки. При активном контроле происходит автоматическое корректирование процесса (в целях получения заданного качества сварки) в зависимости от разности между заданным изменением выбранного оценочного параметра и его фактическим сигналом.

Сопутствующий контроль обеспечивает выдачу сигналов оценки качества на наиболее ранней стадии изготовления сварных узлов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

---

1. Технология и оборудование контактной сварки: учебник / под ред. Б. Д. Орлова. — М. : Машиностроение, 1986. — 352 с.
2. Банов М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: учебник / М. Д. Банов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 224 с.
3. Чуларис А. А. Технология сварки давлением / А. А. Чуларис, Д. В. Рогозин. — Ростов на/Д : Феникс, 2006. — 221 с.
4. Гилевич В. А. Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. — Л. : Машиностроение, 1978.
5. ГОСТ 15878–79. Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры // Сварка, пайка и термическая резка. — М. : Издательство стандартов, 1990. — Ч. 2.
6. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки: учебник / А. И. Гуляев. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
7. Кабанов Н. С. Сварка на контактных машинах / Н. С. Кабанов. — М. : Высшая школа, 1985. — 271 с.
8. Кочергин К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин. — Л. : Машиностроение, 1987. — 240 с.
9. Сергеев Н. П. Справочник молодого сварщика на контактных машинах / Н. П. Сергеев. — М. : Высшая школа, 1984. — 159 с.
10. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / С. И. Кучук-Яценко. — Киев : Наукова думка, 1992. — 236 с.
11. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. Т. IV-6. Оборудование для сварки / под ред. Б. Е. Патона. — М. : Машиностроение. 2002. — 496 с.
12. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / под ред. Ю. Н. Зорина. — М. : Машиностроение, 1979. — Т. 4. — 512 с.
13. Сварка. Резка. Контроль: Справочник: в 2 т. / Под ред. Н. П. Алешина. — М. : Машиностроение, 2004. — Т. 1. — 624 с.
14. Чулошников П. Л. Контактная сварка / П. Л. Чулошников. — М. : Машиностроение, 1987. — 176 с.
15. Гельман А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. — М. : Машиностроение, 1970. — 312 с.
16. Кабанов Н. С. Технология стыковой контактной сварки / Н. С. Кабанов, Э. С. Слепак. — М. : Машиностроение, 1970. — 264 с.

# Оглавление

---

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ.....	5
1.1. Точечная сварка.....	5
1.2. Рельефная сварка.....	7
1.3. Шовная сварка.....	7
1.4. Стыковая сварка.....	8
2. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ, ШОВНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ.....	10
2.1. Общая схема формирования соединения при точечной, шовной и рельефной сварке.....	10
2.1.1. Первый этап.....	10
2.1.2. Второй этап.....	11
2.1.3. Третий этап.....	11
2.2. Физические процессы, протекающие при точечной, шовной и рельефной сварке.....	12
2.3. Процессы нагрева металла при точечной, шовной и рельефной сварке.....	13
2.3.1. Источники теплоты при сварке.....	13
2.3.2. Контактные сопротивления.....	15
2.3.3. Собственное сопротивление деталей.....	19
2.3.4. Общее сопротивление участка электрод—электрод.....	20
2.3.5. Электрические и температурные поля.....	23
2.3.6. Тепловой баланс при сварке.....	27
2.3.7. Особенности режима в зависимости от продолжительности импульса сварочного тока.....	28
2.3.8. Шунтирование тока.....	29
2.3.9. Расчет сварочного тока.....	31
2.4. Пластическая деформация металла при точечной, шовной и рельефной сварке.....	32
2.4.1. Роль пластической деформации.....	32
2.4.2. Микропластическая деформация.....	33
2.4.3. Объемная пластическая деформация при точечной сварке.....	34
2.4.4. Особенности объемной пластической деформации при шовной и рельефной сварке.....	37
2.5. Удаление поверхностных пленок при точечной, шовной и рельефной сварке.....	38

2.6. Сопутствующие процессы при образовании соединений .....	40
2.6.1. Тепловое расширение металла при сварке.....	40
2.6.2. Процессы массопереноса в контакте электрод—деталь.....	41
2.6.3. Влияние термдеформационных процессов на свойства металла зоны сварки .....	43
2.6.4. Образование остаточных напряжений .....	45
2.7. Основные дефекты при точечной, шовной и рельефной сварке ..	46
2.7.1. Непровары .....	46
2.7.2. Выплески .....	48
2.7.3. Несплошности зоны сварки .....	49
2.7.4. Снижение коррозионной стойкости соединений в результате сварки.....	52
2.7.5. Изменение структуры и свойств металла ядра и околошовной зоны.....	53
3. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ....	56
3.1. Общая схема формирования соединения при стыковой сварке....	56
3.2. Физические процессы, протекающие при стыковой сварке .....	57
3.3. Процессы нагрева при стыковой сварке .....	59
3.3.1. Источники теплоты при сварке .....	59
3.3.2. Тепловые процессы при стыковой сварке сопротивлением .....	61
3.3.3. Тепловые процессы при стыковой сварке оплавлением .....	63
3.4. Пластическая деформация металла при стыковой сварке .....	71
3.5. Удаление поверхностных пленок при стыковой сварке .....	73
3.6. Дефекты при стыковой сварке .....	75
4. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ.....	78
4.1. Технологическое конструирование сварных соединений .....	78
4.1.1. Конструктивные элементы соединений .....	80
4.2. Основные операции типового технологического процесса производства сварных узлов .....	83
4.2.1. Изготовление деталей .....	84
4.2.2. Подготовка поверхности.....	84
4.2.3. Сборка.....	88
4.2.4. Прихватка .....	89
4.2.5. Форма и размеры рабочей поверхности электродов и роликов.....	90
4.3. Особенности технологии сварки различных металлов и сплавов.....	96
4.3.1. Программирование процессов контактной сварки .....	96
4.3.2. Параметры режимов контактной сварки .....	101

---

4.3.3. Особенности точечной сварки отдельных конструкционных материалов.....	108
4.3.4. Особенности точечной сварки разных соединений .....	112
4.3.5. Особенности технологии рельефной сварки .....	117
4.3.6. Особенности технологии шовной сварки .....	121
4.3.7. Особенности технологии стыковой сварки.....	123
5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ .....	131
5.1. Методы устранения дефектов сварки .....	131
5.2. Контроль сварных соединений .....	132
5.3. Организация контроля и его место в технологическом процессе.....	137
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	140



*Учебное издание*

**Катаев** Рудольф Федорович  
**Милютин** Виталий Сергеевич  
**Близник** Михаил Германович

## ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Редактор *Л. Ю. Козяйчева*  
Компьютерная верстка *Е. В. Суховой*

Подписано в печать 02.07.2015. Формат 70×100 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 11,61.  
Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 100 экз. Заказ 165.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375–48–25, 375–46–85, 374–19–41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350–56–64, 350–90–13  
Факс: 8 (343) 358–93–06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

